

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

PPGEM

Análise de tensões residuais no processo de trefilação combinada do aço AISI 1048 visando minimizar distorções pós processamento

Rafael Menezes Nunes

**Dissertação para obtenção do Título de Mestre
em Engenharia**

Porto Alegre
2008

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

PPGEM

Análise de tensões residuais no processo de trefilação combinada do Aço AISI 1048 visando
minimizar distorções pós processamento

Rafael Menezes Nunes
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
2008

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, PPGEM - UFRGS

Co-orientador: Priv-Doz. Dr. Ing. Habil. Thomas K. Hirsch, Stiftung Institut für Werkstofftechnik-IWT-Universidade de Bremen, Alemanha.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Juan Carlos Garcia de Blas – COPPE - UFRJ

Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira – DEMEC - UFRGS

Dr. Eng. Alberto Moreira Guerreiro Brito – DEMET – UFRGS

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGEM

“O degrau de uma escada não serve simplesmente para que alguém permaneça em cima dele, destina-se a sustentar o pé de um homem pelo tempo suficiente para que ele coloque o outro um pouco mais alto.” Thomas Huxley

Agradecimentos

Primeiramente aos meus pais e toda minha família, minha futura esposa Aline e sua família e aos meus amigos que me apoiaram em todos os momentos.

Ao meu orientador Alexandre Rocha e ao meu co-orientador Thomas Hirsch que ajudaram em todos os momentos e sem eles este trabalho não seria possível.

A toda a equipe do CADETEC-LAMEF, em especial a Reguly, Odair, Val, Xu, Cláudia, Rogério, Carlos, Toni, Vinicius e Rubão que prestaram toda ajuda desde o início do projeto.

A toda equipe de LdTM, em especial à colega de trabalho Milena e aos estagiários Marcelo e Tiago e ao pessoal da oficina, Marco Aurélio, Gustavo e Luis Eduardo.

A equipe do IWT Bremen, por terem me recebido de braços abertos e a toda ajuda prestada para a realização deste trabalho.

Aos colegas Eduardo Ferlauto, Mauricio Metz e Marco Ressler Fischer.

A FINEP pelo apoio financeiro.

Índice:

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
1.1 Introdução e objetivos	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Tensões Residuais - conceitos fundamentais	3
2.2 Origem das tensões residuais	5
2.2.1 <i>Tensões Residuais nos Processos de conformação mecânica.</i>	6
2.3 Tipos de tensões residuais.	7
2.3.1 <i>Tensões residuais macroscópicas Tipo I.</i>	7
2.3.2 <i>Tensões residuais microscópicas Tipo II.</i>	8
2.3.3 <i>Tensões residuais microscópicas Tipo III.</i>	9
2.4 Controle de distorções durante os processos de manufatura.	11
2.5 Processo de Trefilação combinada.	12
2.5.1 <i>Pré-endireitamento horizontal e vertical.</i>	12
2.5.2 <i>Jateamento.</i>	14
2.5.3 <i>Trefilação</i>	16
2.5.3.1 <i>Trefilação – tensões.</i>	19
2.5.3.2 <i>Trefilação – Cálculo da força</i>	20
2.5.3.3 <i>Parâmetro Δ.</i>	20
2.5.3.4 <i>Efeitos do parâmetro Δ nas tensões residuais.</i>	23
2.5.3.5 <i>Ângulo de fieira ideal</i>	24
2.5.3.6 <i>Tensões residuais durante a trefilação.</i>	25
2.5.4 <i>Processo de polimento e endireitamento por rolos cruzados (PTN).</i>	27
3 MÉTODOS DE MEDIDA DE TENSÕES RESIDUAIS	29
3.1 Técnicas de medida de tensões residuais	29
3.1.1 <i>Método do furo cego</i>	29
3.1.1.1 <i>Preparação da superfície e furo</i>	30
3.1.1.2 <i>Cálculo de tensões residuais a partir das deformações – Método de Kockelmann.</i>	32
3.1.2 <i>Método de difração por raios-X.</i>	33
3.1.2.1 <i>Princípios da técnica.</i>	34
3.1.2.2 <i>Modelo de tensões plano elásticas.</i>	37
3.1.2.3 <i>Método de remoção de camadas.</i>	38
3.1.3 <i>Método de slitting.</i>	39
4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	41
4.1 Metodologia	41
4.1.1 <i>Retirada de amostras no processo de trefilação combinada.</i>	43
4.1.2 <i>Corte de amostras.</i>	43
4.1.3 <i>Instrumentação das barras para realização dos ensaios de hole-drilling.</i>	44
4.1.3.1 <i>Condicionamento da superfície.</i>	45
4.1.3.2 <i>Colagem do extensômetro.</i>	46
4.1.4 <i>Passos para a realização do alinhamento do equipamento de hole-drilling e medições</i>	47
4.1.5 <i>Preparação das barras para realização dos ensaios de difração de raios-X para determinação de tensões residuais.</i>	47
4.1.5.1 <i>Preparação das barras para realização dos ensaios de difração de raios-X com remoção de camadas.</i>	49
4.1.6 <i>Método de slitting.</i>	50
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
5.1 Análise química das amostras.	53
5.2 Caracterização Metalográfica das amostras.	53
5.3 Tensões residuais na etapa de pré-endireitamento.	56
5.3.1 <i>Resultados obtidos por difração de raios-X</i>	56
5.3.2 <i>Resultados obtidos por hole-drilling</i>	58
5.3.3 <i>Resultados obtidos pelo método do slitting</i>	59
5.4 Tensões residuais na etapa de jateamento.	62
5.4.1 <i>Resultados obtidos por difração de raios-X</i>	62
5.4.2 <i>Resultados obtidos por hole-drilling</i>	64
5.4.3 <i>Resultados obtidos pelo método do slitting</i>	66
5.5 Tensões residuais na etapa de Trefilação.	67
5.5.1 <i>Resultados obtidos por difração de raios-X</i>	67
5.5.2 <i>Resultados obtidos por hole-drilling</i>	69
5.5.3 <i>Influência do ângulo de fieira</i>	73
5.5.4 <i>Resultados obtidos pelo método do slitting</i>	75

5.6	Tensões residuais na etapa de polimento e endireitamento por rolos cruzados (PTN).....	76
5.6.1	<i>Resultados obtidos por difração de raios-X</i>	76
5.6.2	<i>Resultados obtidos por hole-drilling</i>	81
5.6.3	<i>Resultados obtidos pelo método do slitting</i>	90
5.7	Visão global de tensões residuais na trefilação combinada.....	92
5.8	Discussão Geral.....	101
6	CONCLUSÕES	102
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	103
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

Índice de figuras:

Figura 1-1 – Etapas principais do processo de trefilação combinada.	2
Figura 2-1 - Deformação não uniforme na laminação, representação esquemática da distribuição das tensões residuais resultantes.	3
Figura 2-2 – Superposição de Tensões residuais e tensões de serviço de um componente.	4
Figura 2-3 – A relação entre temperatura, tensões e microestrutura.	5
Figura 2-4 – Efeitos das tensões residuais no desempenho de um componente.	6
Figura 2-5 - Tensões Residuais do tipo I.	8
Figura 2-6 - Representação esquemática das tensões residuais do tipo II.	9
Figura 2-7- As tensões residuais do tipo III variam em escala de sub-grão l_o^{III} , a qual é muito menor que o tamanho de grão e está em equilíbrio na escala L_o^{III}	10
Figura 2-8 - Representação esquemática das tensões residuais σ_r ao longo da superfície do grão, σ_α^I , primeira ordem, σ_α^{II} , segunda ordem, σ_α^{III} , terceira ordem.	11
Figura 2-9 – Máquina de pré-endireitamento horizontal, vista superior.	13
Figura 2-10 – Máquina de pré-endireitamento vertical, vista lateral.	14
Figura 2-11 - Aspecto microscópico do jateamento mostrando a superfície deformada plasticamente.	15
Figura 2-12 - Diagrama esquemático do perfil de tensões residuais em uma simples indentação causada pelo jateamento.	15
Figura 2-13 - Representação esquemática da ferramenta de trefilação (fieira) e suas quatro regiões principais.	16
Figura 2-14 - Representação do processo de trefilação.	17
Figura 2-15 – tensões durante a trefilação.	19
Figura 2-16 – Exemplos de penetração e distribuição da deformação plástica para diferentes ângulos de fieira.	22
Figura 2-17 - Relação do fator delta com o ângulo de fieira para diversas reduções.	24
Figura 2-18 - Determinação do semi-ângulo ótimo de ferramenta.	25
Figura 2-19 - Influência da redução nas tensões residuais após a trefilação. Adaptado de ASM Handbook of residual stress.	27
Figura 2-20 - Desenho esquemático dos rolos cruzados de endireitamento e polimento (PTN).	28
Figura 3-1 - Tipos de roseta - A - B - C.	30
Figura 3-2 - A- Perfuração em alta velocidade, B- Perfuração em baixa velocidade, C- Usinagem por jato de ar, D- Usinagem química.	32
Figura 3-3 - Espalhamento e difração de raios-X em um arranjo cristalino.	35
Figura 3-4(A-B) - Princípios de medição por difração de raios-X.	36
Figura 3-5 Modelo de tensões elásticas plano.	38
Figura 3-6 - Exemplo de uma remoção de material para caracterização de tensões residuais em uma barra cilíndrica.	40
Figura 4-1-Etapas do processo de trefilação combinada.	41
Figura 4-2 - orientação do maquinário.	43
Figura 4-3 Cuidados tomados em relação à pressão exercida pela morsa nas amostras.	44
Figura 4-4 - Fixação da amostra no equipamento de raios-X.	48
Figura 4-5 - Ajuste da amostra na altura "zero", utilizando o ajuste "Z" do equipamento.	48
Figura 4-6 - Isolamento da amostra, barra trefilada diâmetro 20,65mm.	50
Figura 4-7 – Fixação da amostra no suporte e fixação da barra no suporte para a realização da remoção eletrolítica.	50
Figura 4-8 - Posição periférica das remoções realizadas.	51
Figura 5-1 – Fio-máquina aspecto longitudinal da amostra caracterizando o sentido de laminação, estrutura perlítica (região escura) e ferrita (região clara), ataque Nital 2%, aumento 50X.	53
Figura 5-2 – Fio-máquina, aspecto longitudinal da amostra, estrutura perlítica (região escura) e ferrita (região clara), ataque Nital 2%.	54
Figura 5-3 – Fio-máquina, aspecto transversal da amostra, estrutura perlítica (região escura) e ferrita (região clara), ataque Nital 2%.	54
Figura 5-4 - Barra trefilada, aspecto longitudinal da amostra caracterizando o sentido de trefilação, estrutura perlítica (região escura) e ferrita (região clara), ataque Nital 2%.	55
Figura 5-5 - Barra trefilada, aspecto longitudinal da amostra caracterizando o sentido de trefilação, estrutura perlítica (região escura) e ferrita (região clara), ataque Nital 2%.	55
Figura 5-6 - Fio-máquina pré-endireitado, tensões residuais longitudinais e tangenciais superficiais, caracterizados por difração de raios-X, Cond. I-A.	57
Figura 5-7 - Comparação de tensões residuais longitudinais caracterizados por difração de raios-X, fio-máquina pré-endireitado Cond. II-A e Cond. III-A.	58

<i>Figura 5-8 - Perfis de tensões residuais longitudinais caracterizados por hole-drilling, fio-máquina após o pré-endireitamento, Cond. I-A.</i>	59
<i>Figura 5-9 - Geração de tensões residuais durante o endireitamento de um cilindro.</i>	60
<i>Figura 5-10 - Carregamentos durante o pré-endireitamento.</i>	61
<i>Figura 5-11 - Deflexões apresentadas pelo fio-máquina pré-endireitado, Cond. II-A.</i>	62
<i>Figura 5-12 - Fio-máquina Jateado, tensões residuais longitudinais e tangenciais superficiais, Cond. I-A.</i>	63
<i>Figura 5-13 - Comparação de tensões residuais longitudinais superficiais para o fio-máquina jateado, Cond. II-A e Cond. III-A.</i>	64
<i>Figura 5-14 - Fio-máquina Jateado, comparação do perfil de tensões residuais longitudinais obtidas pelo método de hole-drilling para duas posições periféricas, Cond. I-A.</i>	65
<i>Figura 5-15 - Fio-máquina jateado, comparação de perfil de tensões residuais medidos pelo método de difração de raios-X e hole-drilling, Cond. I-A.</i>	66
<i>Figura 5-16 - Deflexões apresentadas pelo fio-máquina jateado, Cond. II-A.</i>	67
<i>Figura 5-17 - Barra trefilada, tensões residuais longitudinais superficiais, Cond. I-A.</i>	68
<i>Figura 5-18 - Perfil de tensões residuais longitudinais para a barra trefilada com ângulo de fieira 20° - Cond. I-A, medição por difração de raios-X.</i>	69
<i>Figura 5-19 - Perfis de tensões residuais longitudinais medidos pelo método de hole-drilling e difração de raios-X na barra trefilada com ângulo de fieira de 20°, Cond. I-A, valores discrepantes.</i>	70
<i>Figura 5-20- Comparação de perfis de tensões residuais longitudinais para a barra trefilada, utilizando o método de hole-drilling e difração de raios-X com remoção de camadas, ângulo de fieira de 18°, Cond. V-A.</i>	71
<i>Figura 5-21 - Comparação de tensões residuais longitudinais para as técnicas de hole-drilling e difração de raios-X, ângulo de fieira 20°, Cond. II-A.</i>	72
<i>Figura 5-22 - Barra trefilada com ângulo de fieira de 20°, comparação de perfis de tensões residuais longitudinais obtidos por difração de raios-X e hole-drilling.</i>	73
<i>Figura 5-23 - Comparação de perfis de tensões residuais longitudinais obtidos via hole-drilling para a barra trefilada com ângulos de fieira de 15° (Cond. VII-A) e 20° (Cond. II-A).</i>	74
<i>Figura 5-24 - Barra trefilada, perfis de tensões residuais longitudinais obtidos por difração de raios-X - influência do ângulo de fieira, Cond. II-A e Cond. V-A.</i>	75
<i>Figura 5-25 - Deflexões apresentadas pela barra após a trefilação, Cond. II-A.</i>	76
<i>Figura 5-26 - Tensões residuais longitudinais superficiais caracterizadas por difração de raios-X para a barra polida e endireitada por rolos cruzados com ângulo de 16°.</i>	77
<i>Figura 5-27 - Tensões residuais longitudinais superficiais caracterizadas por difração de raios-X para a barra polida e endireitada por rolos cruzados com ângulo de 18°.</i>	78
<i>Figura 5-28 - Comparação do nível de tensões residuais longitudinais em duas amostras distintas, PTN 18° Cond. I-A.</i>	79
<i>Figura 5-29 - Comparação do nível de tensões residuais longitudinais medidos por difração de raios-X. Barra após o endireitamento e polimento (PTN).</i>	80
<i>Figura 5-30 - Comparação do nível de tensões residuais longitudinais com remoção de camadas para o PTN 16° e 18°. Cond. II-A e II-B.</i>	81
<i>Figura 5-31 - Comparação de tensões residuais longitudinais medidas utilizando as técnicas de hole-drilling e difração de raios-X após o polimento e endireitamento por rolos cruzados com ângulo de 16°, Cond. I-A.</i>	82
<i>Figura 5-32 - Perfis de tensões residuais longitudinais após o polimento e endireitamento por rolos cruzados com ângulo de 18°, posição 0°.</i>	83
<i>Figura 5-33 - Tensões residuais longitudinais após o polimento e endireitamento por rolos cruzados (PTN) para diferentes ângulos de PTN utilizando um ângulo de fieira de 16°, Cond. VI-A, VI-B e VI-C.</i>	84
<i>Figura 5-34 - Tensões residuais longitudinais após o polimento e endireitamento por rolos cruzados (PTN) para diferentes ângulos de PTN utilizando um ângulo de fieira de 16°, Cond. VI-A, VI-B e VI-C.</i>	85
<i>Figura 5-35 - Tensões residuais longitudinais após o polimento e endireitamento por rolos cruzados (PTN) para diferentes ângulos de PTN utilizando um ângulo de fieira de 15°, Cond. VII-A, VII-B e VII-C.</i>	86
<i>Figura 5-36 - Tensões residuais longitudinais após o polimento e endireitamento por rolos cruzados (PTN) para diferentes ângulos de PTN utilizando um ângulo de fieira de 15°, Cond. VII-A, VII-B e VII-C.</i>	87
<i>Figura 5-37 - Comparação da variação de tensões residuais longitudinais ao longo do perímetro das barras após o PTN, com ângulos de PTN 15° e 18°, Cond. VI-A e VI-C.</i>	88
<i>Figura 5-38 - Comparação de tensões residuais longitudinais em relação ao ângulo periférico após o polimento e endireitamento por rolos cruzados (PTN) para diferentes ângulos de PTN utilizando um ângulo de fieira de 15°, Cond. VII-A e VII-C.</i>	89
<i>Figura 5-39 - Tensões residuais longitudinais após o polimento e endireitamento por rolos cruzados PTN 16° (Cond. I-A), com remoção de camada por usinagem.</i>	90
<i>Figura 5-40 - Deflexões apresentadas pela barra após o endireitamento por rolos cruzados (PTN 16°), Cond. II-A.</i>	91
<i>Figura 5-41 - Deflexões apresentadas pela barra após o endireitamento por rolos cruzados (PTN 18°), Cond. II-B.</i>	92

<i>Figura 5-42 - Média de tensões residuais longitudinais superficiais em cada etapa do processo, segunda amostragem caracterizados por difração de raios-X.</i>	<i>94</i>
<i>Figura 5-43 - Tensões residuais longitudinais superficiais medidos pelo método de difração de raios-X desenvolvidas nas principais etapas do processo de trefilação combinada, Cond. II-A e Cond. II-B.</i>	<i>95</i>
<i>Figura 5-44 - Comparação das tensões residuais longitudinais após o pré-endireitamento com as tensões residuais longitudinais após a trefilação.</i>	<i>96</i>
<i>Figura 5-45 - Perfis de tensões residuais longitudinais medidos por hole-drilling para as etapas de pré-endireitamento, jateamento e trefilação, orientação em relação ao maquinário 0° e 90°, Cond. I-A.</i>	<i>97</i>
<i>Figura 5-46 - Perfis de tensões residuais longitudinais medidos por hole-drilling para as etapas polimento e endireitamento por rolos cruzados com ângulos de 16° e 18°, orientação em relação ao maquinário 0° e 90°, Cond. I-A e I-B.</i>	<i>98</i>
<i>Figura 5-47 - Perfis de tensões residuais longitudinais medidos pelo método de hole-drilling e difração de raios-X para as diferentes etapas de processamento medidas referentes a posição periférica 0° - Condição de processamento I. (H.D) - Hole-drilling, (R.X) - Difração de raios-X, Cond. I-A.</i>	<i>99</i>
<i>Figura 5-48 - Perfis de tensões residuais longitudinais medidas pelo método de difração de raios-X para a barra trefilada 20° e PTN 16°. Cond. I-A</i>	<i>100</i>

Lista de símbolos e abreviaturas

A	Constante de calibração para o método do furo cego;
B	Constante de calibração para o método do furo cego;
A_0	Área inicial;
A_1	Área final;
Cond.	Condição de processamento
d_0	Diâmetro inicial;
d_1	Diâmetro final;
d_m	Diâmetro médio;
β	Semi-ângulo de entrada;
α	Semi-ângulo de trabalho;
γ	Semi-ângulo de saída;
μ	Coefficiente de atrito;
Δ	Parâmetro Delta;
K_{fm}	Tensão de escoamento média;
K_o	Constante do material;
K_L	Constante do material;
φ	Deformação verdadeira;
H.D.	Técnica de Hole-drilling para determinação de tensões residuais;
γ_0, γ_1	Fase Austenítica;
r	Raio da barra;
l	Comprimento da zona de deformação;
L_i	Comprimento inicial;
L_f	Comprimento final
d'	Espaçamento interplanar;
θ	Ângulo de difração;
n	Número inteiro;
λ	Comprimento de onda;
ε_1	Deformação na direção 1;
ε_2	Deformação na direção 2;
ε_3	Deformação na direção 3;

σ_0	Tensão de escoamento;
σ_1	Tensão na direção 1;
σ_2	Tensão na direção 2;
σ_3	Tensão na direção 3;
σ_t	Tensão de tração;
σ_r	Tensão radial;
σ_s	Tensões de serviço;
$\tau_{máx}$	Tensão cisalhante máxima;
ξ	Variável adimensional;
U	Velocidade de trefilação da barra trefilada (após a fieira);
V	Velocidade de trefilação do fio-máquina (antes da fieira);
PTN	Polimento e endireitamento por rolos cruzados;
P.A.	Reagente Pró-Análise
Pos.	Posição periférica
R.X.	Difração de raios-X
M	Momento fletor
E	Módulo de Young
$\Delta\varepsilon$	Deformação residual
δ	Ângulo entre os rolos de pré-endireitamento
Ai	Área inicial
Af	Área final
Di	Diâmetro inicial
Df	Diâmetro final
τ	Esforço devido ao atrito
H	Diâmetro inicial
P	Velocidade de trefilação
F	Força de trefilação
L	Tamanho da região de contato
h_0	Diâmetro inicial
h_1	Diâmetro final
ε_a	Redução de área
D_0	Diâmetro do furo
z	profundidade do furo

RESUMO

As tensões residuais podem atuar de forma benéfica ou maléfica no desempenho dos componentes mecânicos. Elas representam um dos principais potenciais para o aparecimento de distorções, empenamentos e mudanças dimensionais em componentes mecânicos durante o processo de manufatura. Por estes motivos a determinação da distribuição e o controle destas tensões residuais em cada etapa do processo de manufatura são de grande importância. Neste trabalho, foram realizadas análises da variação das tensões residuais em barras trefiladas de aço AISI 1048 em decorrência do processo de fabricação. As barras foram retiradas de quatro diferentes etapas do processo de trefilação combinada guardando-se a orientação inicial do fio-máquina, sendo elas: pré-endireitada, jateada, trefilada (com ângulos de 15°, 16°, 18° e 20°), endireitada e polida por rolos cruzados (PTN) (com ângulos de 15°, 16° e 18°). Estas barras foram ensaiadas através do método do furo cego (hole-drilling), método da deflexão (slitting) e difração de raios-X. Os ensaios foram realizados até uma profundidade de 1 mm para o método do furo cego e chegando até profundidades de 5,6mm para a técnica de difração de raios-X com remoção de camadas em diferentes posições periféricas para caracterizar heterogeneidades impostas pelo processo. A partir dos valores de deformações obtidos, foram calculadas as tensões residuais nas direções longitudinais e tangenciais para cada posição ensaiada. Com este trabalho foi obtida uma visão completa do desenvolvimento de tensões na região superficial da barra após as etapas do processo e assim foram determinadas quais etapas do processo tem maior influência no produto final (barras trefiladas). Após o pré-endireitamento as tensões são compressivas, aumentando seu nível após o jateamento. Na saída da trefilação as tensões mudam para trativas e após o endireitamento final (PTN) tornam-se menos trativas ou compressivas dependendo do ângulo de endireitamento (PTN) e o ângulo de fieira utilizado. A partir deste estudo foram propostas mudanças nos ângulos de ferramenta (fieira) e também nos rolos de polimento e endireitamento final, objetivando-se um produto final com tensões residuais mais favoráveis a processos subsequentes de manufatura. Outro aspecto importante verificado é a variação das tensões residuais em relação à posição periférica: diferenças de até 200MPa foram verificadas até antes da etapa de endireitamento final PTN, após a qual as diferenças são reduzidas a quase zero.

Palavras chave: trefilação combinada, tensões residuais, "potencial de distorção", difração de raios-X, método do furo cego.

ABSTRACT

The residual stresses can affect positively or negatively the behavior of mechanical components. These residual stresses also represent one of the main potentials for distortion (i.e. bending and dimensional changes) in mechanical components during the manufacturing. Therefore the determination of the distribution and the control of these residual stresses in each stage of the manufacturing process are of great importance. In this work the variation of residual stresses in cold-drawing of AISI 1048 steel bars due to the production process was analyzed. Samples were taken from five different stages of the process of combined cold-drawing with special care to keep the information about initial orientation. The process steps from where samples were taken were: pre-straightening, shot-blasting, drawing, straightening and polishing in crossed rolls (PTN) with angles of 16° and 18° . The determination of residual stresses was accomplished by the hole drilling method. The measurements were done until a depth of 1 mm in different angular positions on the periphery to characterize heterogeneities imposed by the process. Starting with the obtained strains, the residual stresses were calculated in the longitudinal and tangential directions for each measurement position. With this work a global view of the developed stresses in the surface of the bar after each process stage was obtained. After the pre-straightening the residual stresses are compressive, and increase their level after the shot blasting, at the end of drawing the residual stresses change for tensile and after the polishing with crossed rolls (PTN) they become less tensile or slightly compressive depending on the PTN - angle and draw angle used. Based on this study, changes were proposed in the tool (draw) angles and also in the PTN, being aimed at a final product with more favorable residual stresses to subsequent manufacturing operations. Another verified important aspect is the variation of the residual stresses in relation to the peripheral position: differences of up to 200MPa were verified before the stage of polishing in crossed rolls (PTN), after which the differences are almost reduced to nearly zero.

Key words: Combined cold-drawing, residual stresses, "distortion potential", X-ray diffraction, hole-drilling.

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 Introdução e objetivos

A modernização dos processos industriais e a forte competitividade para se obter um produto com baixo custo fazem com que todos os parâmetros das etapas do processo de manufatura sejam conhecidos e controlados. O conhecimento dos fatores que alteram as propriedades do produto durante a fabricação é o primeiro passo para a minimização de custos de fabricação. A partir do controle dos parâmetros do processo, pode-se obter um produto com as propriedades desejadas evitando assim perda de matéria-prima com produtos não conformes.

Um dos grandes problemas enfrentados na indústria metal-mecânica são as distorções de forma. Estas distorções estão diretamente ligadas às tensões residuais que podem vir a alterar a resposta do componente ou sistema quando em uso ou durante os processos de manufatura. Estas tensões residuais podem inclusive gerar perda de matérias-primas ocasionadas por distorções de forma, quebra de componentes durante tratamentos térmicos, em etapas posteriores do processo de fabricação ou ainda a quebra catastrófica do componente quando em serviço.

Visando uma caracterização completa das tensões residuais superficiais e o estudo da influência de cada etapa de processamento nas tensões residuais apresentadas no produto final (barras trefiladas). Este trabalho foi realizado com o intuito de entender como são originadas estas tensões residuais e qual o comportamento em cada etapa do processo.

A trefilação combinada é um processo de produção de barras do qual a matéria-prima é o fio-máquina laminado a quente e fornecido em bobinas. Na Figura 1-1 são mostradas as etapas principais da trefilação combinada. Primeiramente a matéria-prima (fio-máquina) é inserida em um desbobinador sendo após pré-endireitada horizontal e verticalmente. Esta etapa é necessária devido ao formato inicial do fio-máquina ser uma bobina. Após o pré-endireitamento, a próxima etapa consiste na limpeza para remoção de carepas do fio-máquina e isto é realizado com jato de granalhas. O fio-máquina estando endireitado e limpo pode ser trefilado. Após a trefilação o fio-máquina trefilado é cortado, passando desta forma a ser denominado barra trefilada. Após o corte as barras trefiladas são polidas e endireitadas por rolos cruzados, conhecidos comercialmente como PTN.

As tensões residuais no processo de trefilação combinada podem apresentar variações de comportamento durante o processo, passando de compressivas a trativas conforme a etapa de processamento. Na primeira etapa de processamento do material, o pré-endireitamento, as tensões residuais podem variar de trativas a compressivas, dependendo da posição periférica da barra [Wang, 2002]¹⁰¹. A segunda etapa do processo, o jateamento, induz tensões residuais compressivas, independente do nível de tensões residuais apresentado pelo fio-máquina na etapa anterior de processamento [Townsend et al, 1982]. A terceira etapa de

processamento do material, trefilação, induz tensões residuais trativas [Wang, 2002]⁴³, [Akikazu et al, 2001]⁴⁴, [Elices, 2004]⁴⁵, [Atienza et al, 2003]⁴⁸ e [Atienza et al, 2004]⁴⁹. A última etapa do processo, polimento e endireitamento por rolos cruzados (PTN), induz tensões residuais compressivas [Wu et al, 2000]⁸⁸, [Paech, 2002]²⁶ e [Rivolta et al, 2004]⁵¹. Entretanto, as tensões residuais geradas durante esta última etapa podem não ser suficientes para anular os efeitos das tensões residuais trativas geradas durante a etapa de trefilação. Desta forma, o produto final poderá apresentar tensões residuais trativas ou compressivas na superfície, e este comportamento depende dos parâmetros utilizados durante o processamento do material.

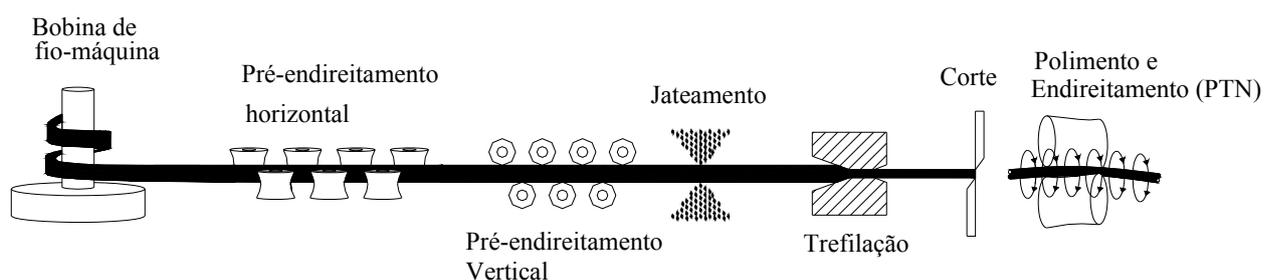


Figura 1-1 – Etapas principais do processo de trefilação combinada.

Este trabalho foi distribuído em cinco capítulos, da seguinte forma:

Na revisão bibliográfica são revisados conceitos fundamentais das tensões residuais, controle de distorções durante os processos de manufatura e as etapas principais da trefilação combinada.

Nos métodos de medida de tensões residuais são discutidas as técnicas utilizadas neste trabalho para a caracterização de tensões residuais, sendo estas: difração de raios-X, hole-drilling e slitting.

O procedimento experimental mostra como foram realizadas as preparações de amostras para as técnicas de difração de raios-X e hole-drilling e slitting, bem como os parâmetros utilizados durante os ensaios. Também são mostrados os procedimentos utilizados nas retiradas de amostras durante o processo de fabricação (trefilação combinada).

A seção dos resultados apresenta os dados obtidos através das técnicas de análise utilizadas para a caracterização de tensões residuais via hole-drilling, difração de raios-X e slitting, bem como análises metalográficas e de microdureza das amostras e demais resultados, e também uma discussão geral para cada etapa do processo.

Nas conclusões são destacados os principais resultados obtidos durante os ensaios e quais alterações de parâmetros do processo foram essenciais para a obtenção do produto final com as características desejadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tensões Residuais - conceitos fundamentais

Tensões residuais são as tensões existentes em um corpo sólido sem aplicação de forças externas (incluindo gravidade) ou gradientes térmicos. Todo sistema de tensões residuais está em equilíbrio e o somatório das forças resultantes e dos momentos produzidos será zero. O valor máximo em módulo que as tensões residuais poderão chegar é o próprio limite de escoamento do material. Valores de tensões acima do limite de escoamento do material irão ocasionar uma deformação plástica do material, havendo assim, uma redistribuição das tensões residuais [Lu, 1996]¹.

A avaliação das tensões residuais é um estágio muito importante no aumento de desempenho de materiais, o controle da deformação de componentes e o entendimento de processos industriais [Lodini, 2003]². Todos os processos mecânicos de fabricação que envolvem deformação plástica, gradientes térmicos, transformações de fase, provavelmente produzirão um componente com tensões residuais, seja ela elevada ou não e estas tensões residuais afetarão diretamente as propriedades do material em relação à resistência a fadiga, resistência a corrosão e resistência a ruptura [Lu, 2002]³. É importante o entendimento de como estas tensões residuais estão distribuídas no material, assim, pode-se modificá-las em favor do componente ter melhores propriedades mecânicas em serviço.

As tensões residuais são geradas por deformação plástica não uniformes. Em conformação mecânica um método pelo qual as tensões residuais poderão ser produzidas é mostrado na Figura 2-1 [Dieter, 1986]⁴.

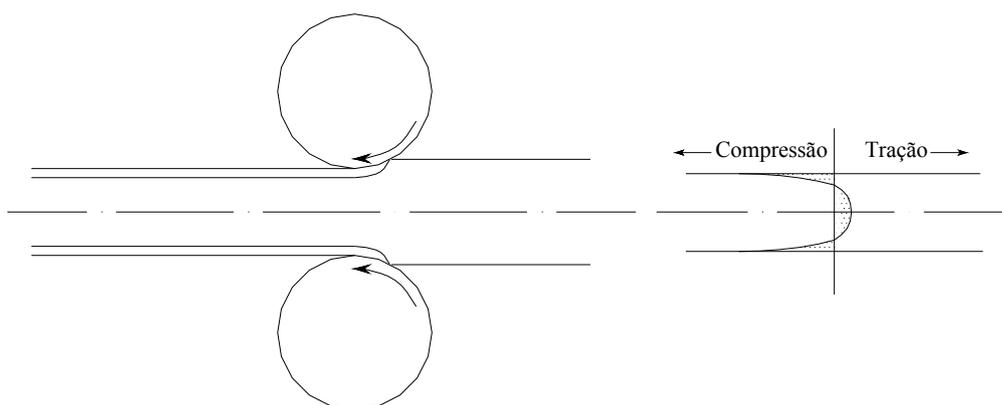


Figura 2-1 - Deformação não uniforme na laminação, representação esquemática da distribuição das tensões residuais resultantes.

A Figura 2-1 [Dieter, 1986]⁴ demonstra um exemplo de laminação onde o escoamento plástico ocorre somente na superfície da barra, assim, os grãos da superfície tendem a alongar-se. Por outro lado, os grãos

do centro da barra não são afetados, e como resultado as tensões residuais distribuem-se de forma compressiva na superfície e trativas no centro da barra, conforme esquematizado na figura.

O sistema de tensões residuais presentes em um material sempre estará em equilíbrio e a soma das tensões totais trativas e compressivas no corpo sempre será zero. Assim, plotando-se uma curva das tensões trativas e compressivas presentes no material como demonstrado na Figura 2-1, a soma das áreas abaixo da curva será zero. Na prática, a determinação destas curvas é complexa, pois o estado de tensões apresentado no material é tridimensional [Lu, 1996]¹, [Dieter, 1986]⁵.

As tensões residuais apresentam um caráter elástico, assim, o valor máximo que estas tensões podem atingir é a tensão de escoamento do material. Também definem-se as tensões residuais como sendo ordinárias, ou seja, as tensões são somadas umas as outras. As tensões residuais do tipo I (macroscópicas) também somam-se com as tensões em serviço do material. Quando um material é submetido a um campo de tensões residuais elásticas caracterizado por um Tensor σ_r ao qual se superpõem as tensões de serviço definidas pelo tensor σ_s , a tensão real ao qual o componente estará submetido será dada por $\sigma_r + \sigma_s$, conforme mostrado na Figura 2-2 [Lu, 2002]⁶. Quando um componente com tensões trativas na superfície sofre carregamento de tração, este material será sobrecarregado localmente pelas tensões residuais trativas existentes na superfície do componente. O inverso ocorre quando um componente com tensões residuais compressivas na superfície sofre carregamento trativo, as tensões residuais compressivas irão subtrair as tensões trativas aumentando o desempenho deste componente em serviço. As tensões residuais podem ser aliviadas aquecendo o material até uma temperatura onde a tensão de escoamento do material é igual ou inferior às tensões residuais presentes no material [Lu, 1986]¹, [Burakowski, 1999]⁷.

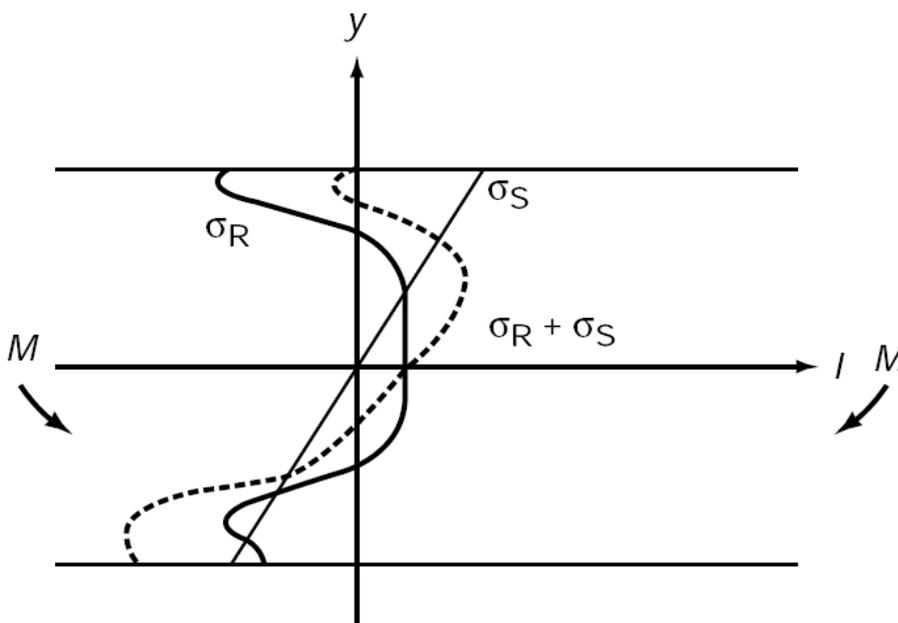


Figura 2-2 – Superposição de Tensões residuais e tensões de serviço de um componente.

2.2 Origem das tensões residuais

As tensões residuais são produzidas no material e nos componentes mecânicos durante a fabricação em vários processos, e todos os processos de manufatura irão introduzir tensões residuais no componente fabricado. As origens das tensões residuais estão relacionadas a processos químicos, térmicos ou mecânicos [Noyan & Cohen, 1987]⁸.

- Deformação plástica: forjamento, laminação, extrusão, shot-peening, dentre outros. Ocorre principalmente onde há deformação plástica não uniforme no material.
- Durante processos de fabricação: usinagem, soldagem, eletrodeposição, dentre outros.
- Durante tratamentos térmicos, termoquímicos ou ciclos térmicos: nitretação, PVD, CVD, cementação, têmpera, fundição, dentre outros. Ocorre principalmente onde exista variação de temperatura não uniforme na peça durante um ciclo de aquecimento e resfriamento ou variações de composição química na peça.

As tensões residuais são conseqüências das interações do material com o meio e os fatores que o alteram são tempo, temperatura, tensão, deformação e microestrutura, ilustrado na Figura 2-3. As características do material que influenciam as tensões residuais são a condutividade térmica, calor específico, coeficiente de dilatação, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, plasticidade, termodinâmica e cinética das transformações, mecanismos de transformações e transformações plásticas [Bhadeshia, 2002]⁹.

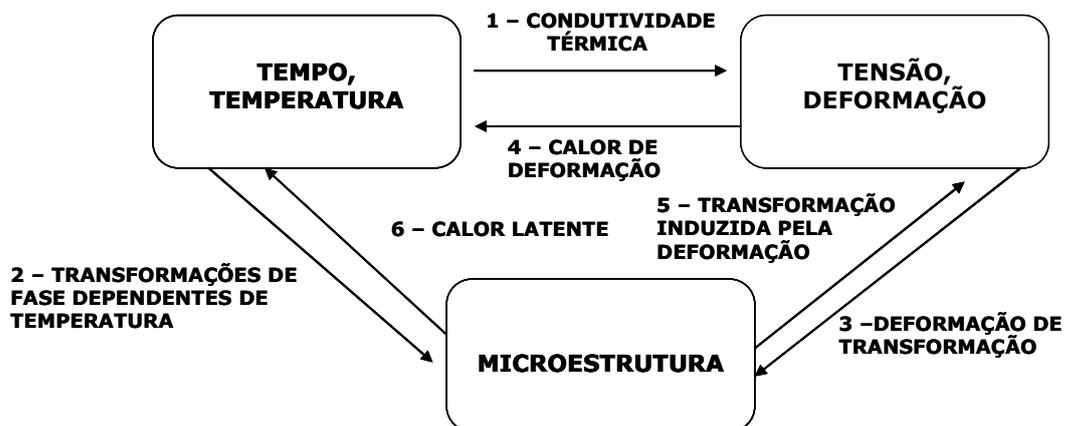


Figura 2-3 – A relação entre temperatura, tensões e microestrutura.

Na Figura 2-3 [Bhadeshia, 2002]⁹ pode-se observar que para os processos de trefilação os fatores mais importantes a serem considerados são: a transformação de forma induzida pela deformação que afeta propriedades na microestrutura do material e as tensões de deformação, que também influenciarão muito nas tensões residuais do material. Outros fatores também poderão ocorrer em menor escala no processo de trefilação com menor contribuição para distorções.

A Figura 2-4 [Lu, 2002]¹¹ mostra as propriedades do material que são afetadas pelas tensões residuais. Entre todos os efeitos relacionados, o mais importante para o presente trabalho é a estabilidade dimensional. Este problema é conhecido e estudado há muito tempo: um exemplo prático pode ser dado na usinagem de uma barra, no qual o alívio das tensões residuais presentes no material ocasionam uma mudança dimensional no componente [Lu, 2002]¹⁰.

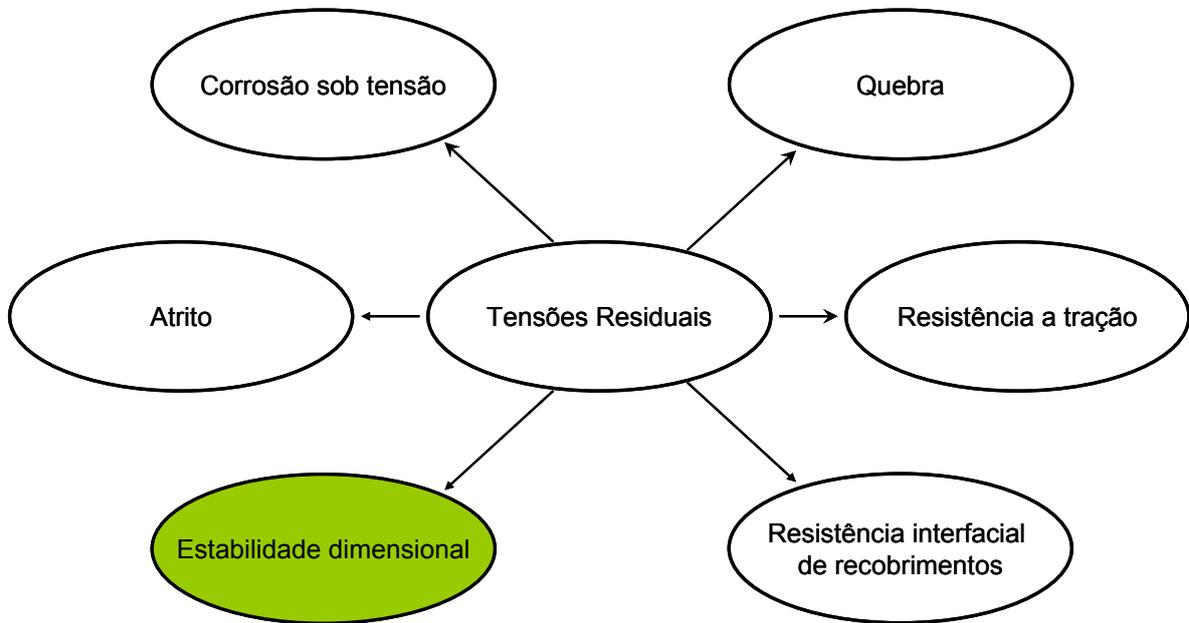


Figura 2-4 – Efeitos das tensões residuais no desempenho de um componente.

Os mecanismos de deformação plástica são: deslizamento, maclação e fluência. Transformações de fase também podem ocasionar deformações permanentes. Nos aços, a austenita poderá se decompor em várias outras microestruturas [Christian, 1962]¹². Todas estas transformações de fase causam mudança na densidade do material. Em um aço austenita pode se decompor em uma grande variedade de microestruturas, que irão se distinguir pelo mecanismo atômico de transformação. Estas transformações de fase causam uma variação nas tensões residuais do material. Um exemplo seria a transformação martensítica em uma superfície de um aço cementado, neste caso a superfície terá tensões trativas, devido a menor densidade da martensita.

2.2.1 Tensões Residuais nos Processos de conformação mecânica.

Todos os produtos metálicos, à exceção de produtos fundidos, são submetidos a algum processo de conformação [Wang, 2002]¹³. Todas estas operações têm como um objetivo a mudança de forma do material. Barras de aço são muito utilizadas na indústria para confecção de vários produtos, tais como arames, tubos, barras para construção civil e mecânica, etc. Estes produtos são obtidos por trefilação, que consiste em diminuir a seção do material, que passa através de uma matriz cônica fazendo a redução de diâmetro.

Nos últimos anos tem-se estudado o processo de trefilação, porém a ciência ainda está muito longe de entender todos os processos envolvidos na trefilação, como o fluxo de material na ferramenta para evitar a fratura da barra durante o processo [Nakagiri, 2000]¹⁴ e também otimizar o design da ferramenta [Godfrey, 2000]¹⁵.

2.3 Tipos de tensões residuais.

Podemos classificar as tensões residuais em um sólido de acordo com a sua magnitude, de três formas diferentes: tensões residuais macroscópicas ou do Tipo I, tensões residuais microscópicas do Tipo II, tensões residuais microscópicas do Tipo III. Esta classificação foi proposta baseada na magnitude das tensões residuais [Macherauch & Kloss, 1986]¹⁶. Para as tensões macroscópicas a magnitude é maior e afeta uma porção maior de material, por outro lado as tensões microscópicas desenvolvem-se em escala muito menor, podendo desenvolver-se em escala atômica. Também se pode classificar as tensões residuais de acordo com sua origem. Um exemplo seriam as tensões residuais macroscópicas que podem originar-se de tratamentos térmicos, usinagem e processos de conformação mecânica, entre eles, em especial, a trefilação, objeto de estudo deste trabalho.

2.3.1 Tensões residuais macroscópicas Tipo I.

São as tensões residuais que se distribuem em larga escala e se equilibram por todo o componente. Na classificação das tensões residuais macroscópicas considera-se o material como sendo homogêneo e em uma visão macroscópica. São as tensões medidas por métodos de dissecação do material, como por exemplo, hole-drilling e métodos de secção (slitting). As tensões residuais podem ser benéficas ou maléficas ao desempenho do componente. Um exemplo é a diminuição da vida em fadiga de componentes com tensões residuais trativas na superfície. As tensões residuais macroscópicas também inabilitam o material a manter sua dimensão durante os processos de fabricação, pois durante estes processos pode haver uma redistribuição das tensões no material, ocasionando assim, uma distorção remanescente. Estas tensões são causadas pelas interações mútuas de zonas de tamanhos macroscópicos do material, conforme mostrado na Figura 2-5 [Hutchings, 2005]¹⁷. Elas podem ser originadas pelos processos de manufatura e se superpõem às tensões externas aplicadas no componente. Portanto, estas são as tensões que apresentam maior interesse no ramo da engenharia. A formação destas tensões é causada principalmente por fatores externos, tais como efeitos de deformação plástica não uniforme no material durante os processos de fabricação ou ainda gradientes de temperatura que causam expansões não uniformes no material.

Tensões Residuais do tipo I

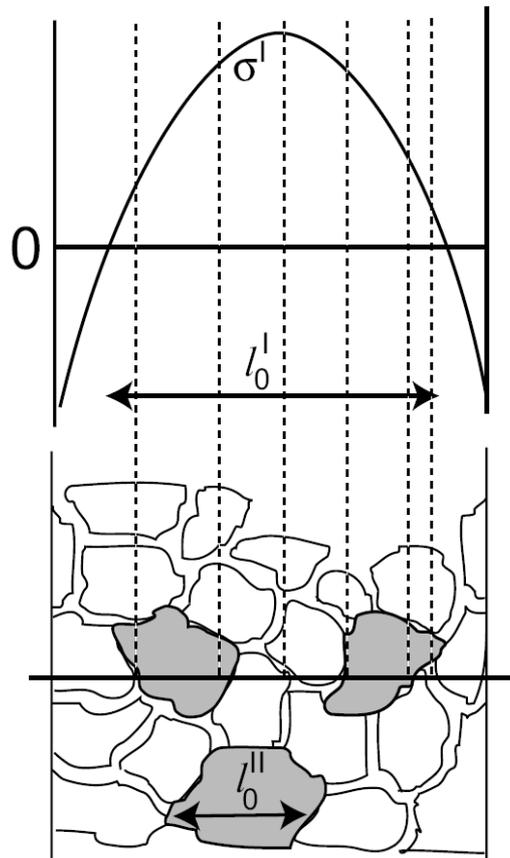


Figura 2-5 - Tensões Residuais do tipo I.

2.3.2 Tensões residuais microscópicas Tipo II.

As tensões residuais do tipo II, também chamadas de microscópicas, são formadas pela não homogeneidade da estrutura cristalina do material [Hutchings , 2005]¹⁸. Estas tensões residuais estão associadas ao domínio cristalino do material, como por exemplo, o grão e também fases presentes no material. As tensões do tipo II estão relacionadas ao balanço entre diferentes grãos ou fases presentes no material, conforme exemplificado na Figura 2-6 [Hutchings , 2005]¹⁹, onde observam-se as tensões geradas em diversos grãos do material.

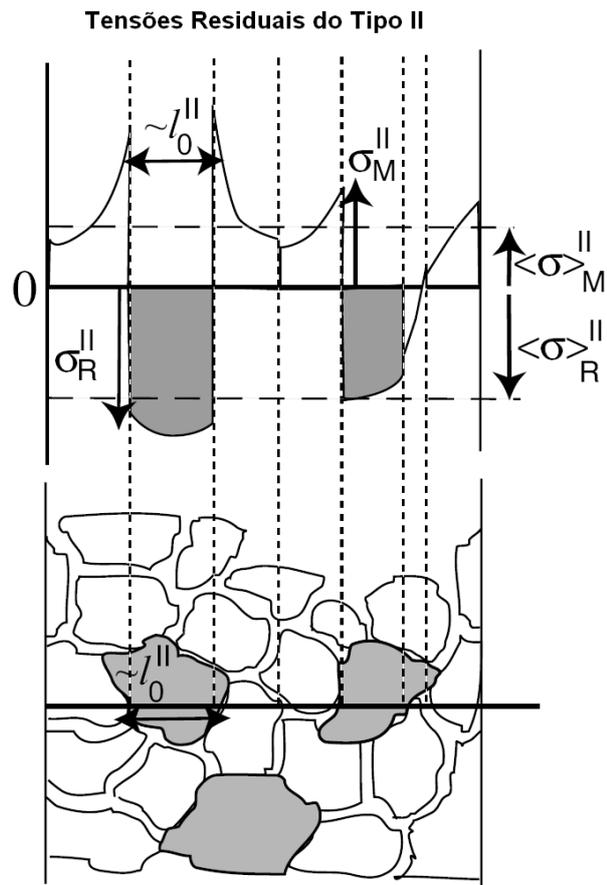


Figura 2-6 - Representação esquemática das tensões residuais do tipo II.

2.3.3 Tensões residuais microscópicas Tipo III.

As tensões residuais do tipo III existentes na escala atômica, correspondem a ação criada por todos os diferentes tipos de defeitos cristalinos. Na Figura 2-7 [Hutchings , 2005]²⁰ são mostrados os deslocamentos e vacâncias nos interstícios cristalinos e como estes deslocamentos afetam nas tensões residuais de III ordem, as tensões residuais do tipo III variam em escala de sub-grão l_0^{III} , a qual é muito menor que o tamanho de grão e está em equilíbrio na escala L_0^{III} .

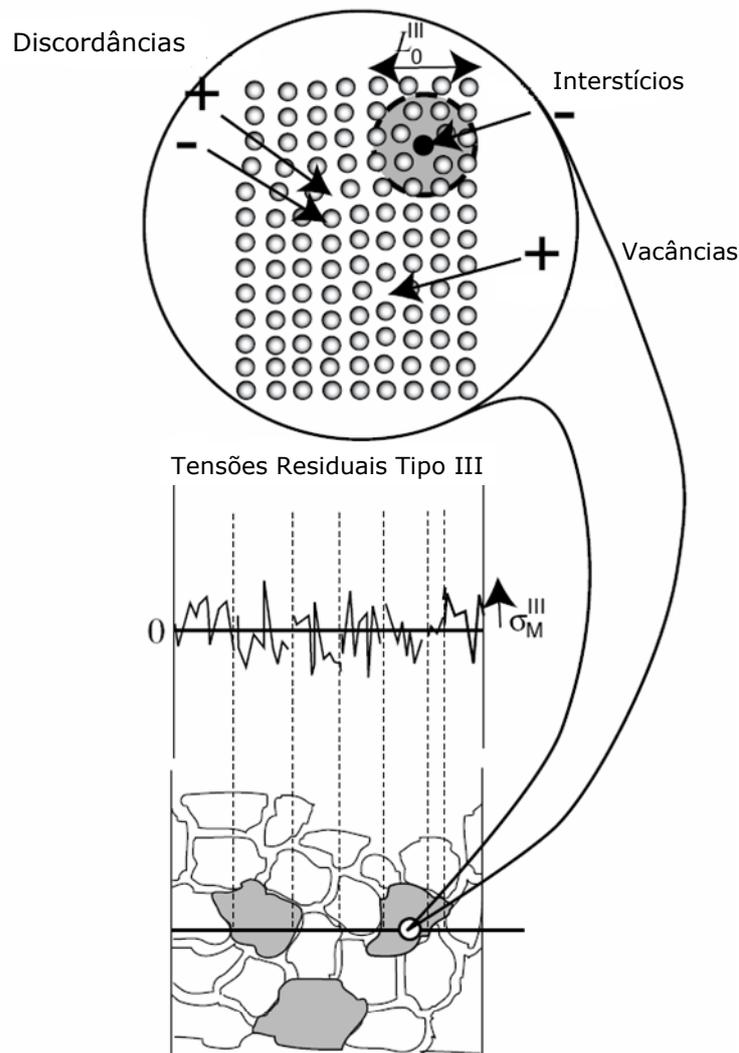


Figura 2-7- As tensões residuais do tipo III variam em escala de sub-grão l_o^{III} , a qual é muito menor que o tamanho de grão e está em equilíbrio na escala L_o^{III} .

Na Figura 2-8 [Fitzpatrick & Lodini, 2003]²² são mostradas as tensões residuais de primeira ordem σ_α^I que abrangem um número elevado de grãos do material e têm uma distribuição homogênea ao longo do material, as suas forças são balanceadas em todos os planos. As tensões residuais de segunda ordem representadas por σ_α^{II} são homogêneas em uma pequena porção do material, como por exemplo, um grão ou uma fase. As forças internas relacionadas a este tipo de tensão estão em equilíbrio entre grãos ou fases. As tensões residuais de terceira ordem representadas por σ_α^{III} , são homogêneas no menor domínio cristalino do material, a pequenas distâncias interatômicas. As forças internas referentes a estas tensões estão em equilíbrio para pequenos domínios do material, como por exemplo, defeitos pontuais ou deslocamentos a nível cristalino [Fitzpatrick & Lodini, 2003]²¹.

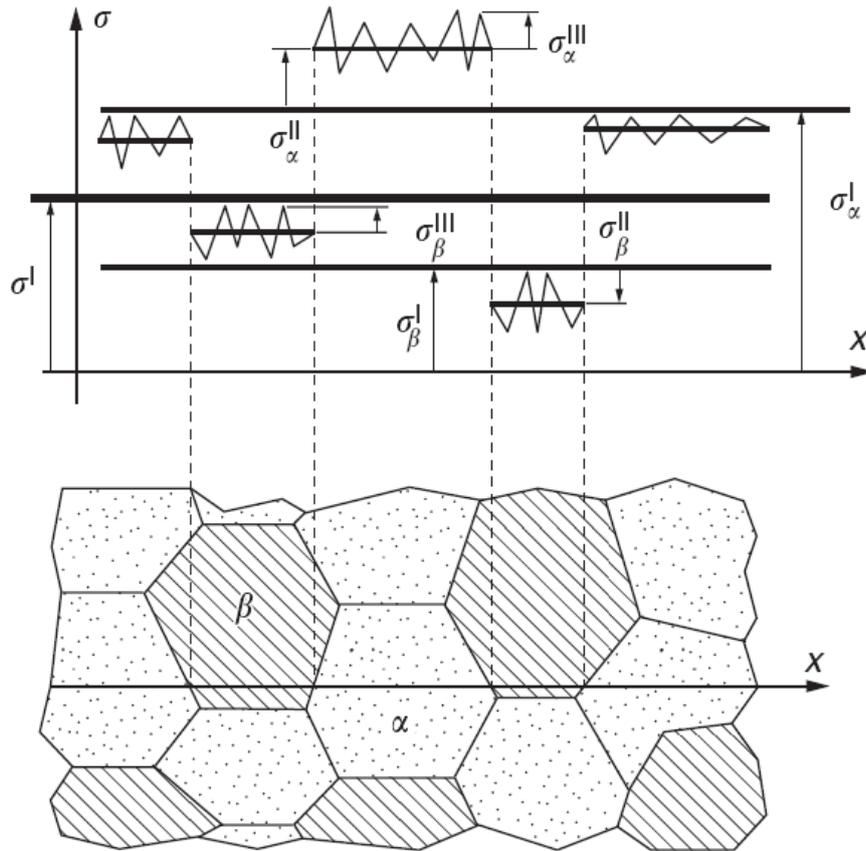


Figura 2-8 - Representação esquemática das tensões residuais σ_r ao longo da superfície do grão, σ_α^I , primeira ordem, σ_α^{II} , segunda ordem, σ_α^{III} , terceira ordem.

2.4 Controle de distorções durante os processos de manufatura.

Durante o processo de manufatura a tendência atual é sempre buscar um produto mais competitivo, sempre visando a minimização de sub-etapas de fabricação e perdas com produtos não conformes. Durante os processos de manufatura, muitas vezes ocorrem empenamentos e distorções de componentes, tornando necessárias sub-etapas de fabricação para a realização de endireitamentos e desempenamentos de componentes. A idéia principal do controle destas distorções está associada a um controle de todo o processo produtivo, e que todas as etapas do processo produtivo contribuem no comportamento em relação às distorções do componente. Desta forma, cada etapa estará alterando alguma propriedade do material que assim poderá estar alterando o "potencial de distorção" do material. Podendo-se definir que o "potencial de distorção do material" é a soma de todos os parâmetros alterados durante a rota de fabricação do material que influenciaram negativamente em mudanças de forma do componente. Desta forma, para haver uma otimização do material e conseqüentemente uma diminuição do potencial de distorção, todas as etapas do processo de fabricação devem estar sob controle e o conhecimento do nível de tensões residuais desenvolvida em cada etapa de processamento é o primeiro passo para a otimização [Zoch, 2006]²³.

Um exemplo do quanto é perdido pela indústria devido a distorções e empenamentos durante o processo de fabricação foi citado por Zoch em seus estudos [Zoch, 2006]²⁴. O autor afirma que a cada ano são perdidos, em etapas de correção de distorções, na Alemanha, 850 milhões de Euros, somente na produção de engrenagens de transmissão. Em vista destes dados mostra-se a necessidade de se estudar estas distorções entendendo-se o processo como um todo.

2.5 Processo de Trefilação combinada.

O processo de fabricação das barras por trefilação combinada em estudo passa por várias etapas. O processo inicia pelo pré-endireitamento do fio-máquina, após o fio-máquina passa por um jateamento objetivando-se a remoção de carepas e sujidades superficiais. A próxima etapa do processo é a trefilação. Em seguida o fio-máquina trefilado é cortado em barras, podendo assim passar pelo polimento e endireitamento por rolos cruzados (PTN). As principais etapas do processo de trefilação combinada são descritos a seguir:

2.5.1 Pré-endireitamento horizontal e vertical.

Os processos de endireitamento são fundamentais no processo de trefilação para assegurar a qualidade do fio-máquina a ser trefilado. A utilização do endireitamento se faz necessária devido a forma com que o fio-máquina (matéria-prima) é fornecido após a laminação. Este fio-máquina é fornecido em forma de bobinas e o modo com que este material é enrolado está associado à armazenagem e também à facilidade em se manipular a matéria prima durante o processo, devido ao grande comprimento de material.

Os rolos de desempenho são constituídos aos pares, sendo este par composto por um rolo superior e outro inferior. A quantidade de rolos necessários para desempenar a matéria-prima depende fundamentalmente da aplicação e grau desejado para o desempenho. Um número de 5 rolos é suficiente para se obter um bom grau de desempenho nas barras trefiladas. Existem casos específicos onde se aumenta o número de rolos no processo em virtude do grau de empenamento desejado ser menor, podendo-se chegar a um máximo de 21 rolos no caso de chapas de baixa espessura [Rodrigues & Martins, 2005]²⁵.

O resultado final do pré-endireitamento não depende apenas da posição do conjunto de rolos de pré-endireitamento, outros fatores também devem ser levados em conta no momento de se fazer o "setup" do equipamento, entre estes fatores pode-se citar: módulo de elasticidade, curvatura inicial, diâmetro do fio-máquina, entre outros fatores [Paech, 2002]²⁶.

O modo de funcionamento do endireitamento por rolos pode ser entendido considerando um sistema de rolos composto por 5 rolos, sendo 2 superiores e 3 inferiores. Neste sistema são efetuadas sucessivas

flexões e contra flexões, sendo que a curvatura diminui ao longo do processo devido ao plano que contém os rolos inferior e superior fazerem um ângulo entre si, este é ângulo denominado de ângulo δ .

Este sistema constituído por 2 rolos superiores e 3 rolos inferiores constitui um conjunto de 3 endireitadores, no primeiro endireitador a barra é deformada plasticamente de modo com que a barra atinja uma mesma curvatura. Em seguida pela passagem do segundo conjunto, também ocorrem deformações plásticas, porém, em sentido contrário. Finalmente no terceiro conjunto de rolos endireitadores ocorre a deformação no mesmo sentido do primeiro conjunto de rolos endireitadores, porém com uma intensidade de deformação igual à recuperação elástica do material. Obtém-se assim, no final do conjunto, uma barra endireitada. O sistema de pré-endireitamento horizontal estudado neste trabalho é mostrado na Figura 2-9, este sistema é composto de dois rolos de guiamento e tracionamento do fio-máquina, representado em vermelho, e após três rolos superiores e três inferiores, que provocarão sucessivos momentos fletores no fio-máquina fazendo assim o pré-endireitamento horizontal. Os momentos fletores induzidos no fio-máquina dependerão fundamentalmente da posição dos rolos em relação à linha central do maquinário, quanto mais próximos a linha central maior será o momento aplicado ao fio-máquina.

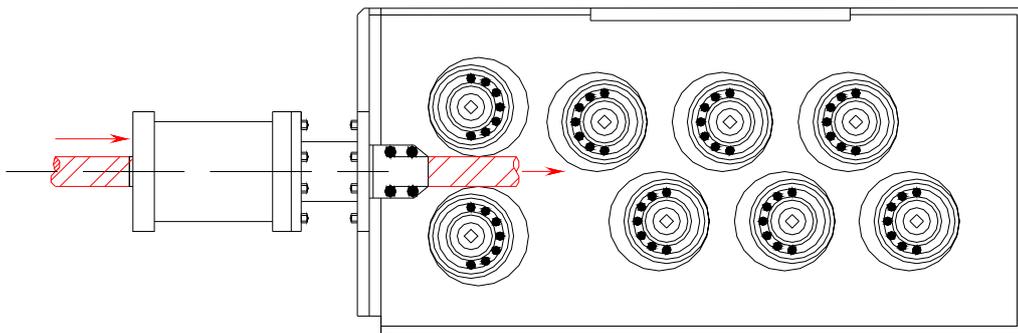


Figura 2-9 – Máquina de pré-endireitamento horizontal, vista superior.

Considerando que o fio-máquina (matéria-prima) é laminado e enrolado ainda a quente, podemos considerar que o nível de tensões residuais presentes no fio-máquina é próximo a zero. Porém, este fio-máquina, ao passar pelos rolos pré-endireitadores, em virtude das deformações plásticas ocorridas no processo, o material irá ficar com tensões residuais.

A segunda etapa de pré-endireitamento é composta por rolos de pré-endireitamento horizontal, conforme mostrado na Figura 2-10. Devido ao pré-endireitamento existente no fio-máquina o número de rolos de pré-endireitamento vertical é menor, necessitando apenas dois rolos na parte superior e três rolos na parte inferior do equipamento.

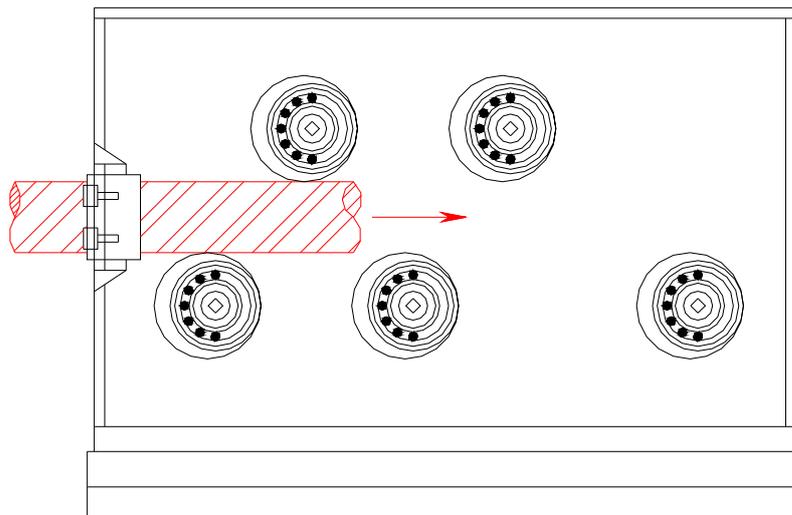


Figura 2-10 – Máquina de pré-endireitamento vertical, vista lateral.

As tensões residuais em cada conjunto de rolos podem ser definidas como sendo a derivação do momento fletor “M” aplicado à barra no momento da passagem no conjunto de rolos. No segundo estágio de rolos a barra será submetida a um momento fletor “M” de sentido contrário ao primeiro, porém com menor intensidade ao aplicado no primeiro conjunto de rolos, que resultará uma soma das tensões residuais do primeiro estágio com o segundo estágio. Considerando a última etapa de rolos como somente aplicação de tensões para a recuperação elástica do material, nesta etapa não resultarão tensões residuais na barra, pois não haverá deformação plástica no material [Rodrigues & Martins, 2005]²⁷.

2.5.2 Jateamento.

O jateamento é largamente usado no meio industrial como uma forma simples, prática e de relativo baixo custo para limpeza de peças metálicas. No processo de trefilação combinada o jateamento é de vital importância para que o fio-máquina não tenha sujidades antes de passar pela fieira. Um equipamento básico de jateamento para fio-máquina é composto de quatro bocais dispostos ao longo do equipamento e defasados de 90° cada, jateando assim toda a periferia do fio-máquina. As partículas utilizadas são basicamente esferas feitas de aço, cerâmica ou polimérica, com tamanhos variando entre 50µm até 6 mm em diâmetro, e tendo velocidades de até 150 m/s.

O princípio básico do jateamento é mostrado na Figura 2-11 [Fitzpatrick, 2003]²⁸. As granalhas são arremessadas contra a superfície do fio-máquina em alta velocidade e assim a superfície do fio-máquina é limpa e uma pequena porção superficial do material é deformada plasticamente.

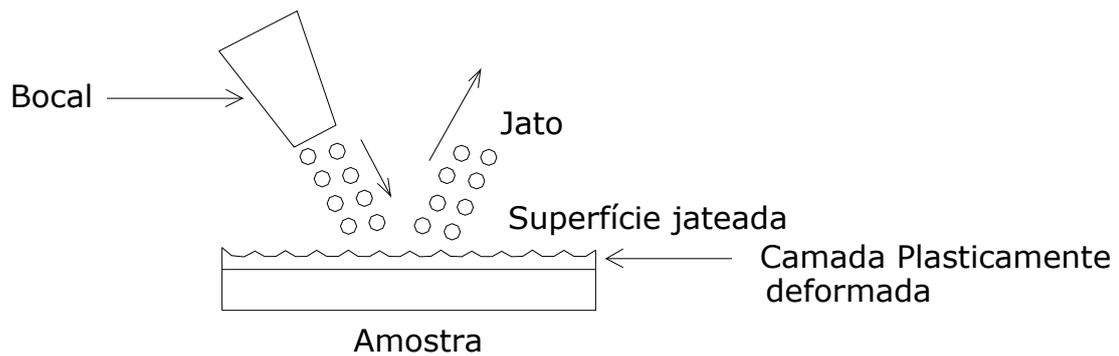


Figura 2-11 - Aspecto microscópico do jateamento mostrando a superfície deformada plasticamente.

Outra aplicação típica do jateamento é na utilização para o aumento da vida em fadiga de componentes mecânicos. As deformações superficiais no jateamento induzem tensões residuais compressivas, pois o material usado no jateamento tem uma granulometria muito alta ocasionando pequenas deformações plásticas no material a nível macroscópico [Tange, 2000]²⁹, [Fitzpatrick, 2003]³¹, [Townsend, 1982]³⁰, [Murphy, 1997]³², conforme mostrado na Figura 2-12 [Fitzpatrick, 2003]³¹, as deformações impostas pelas granalhas induzem tensões trativas no núcleo do material e a superfície, desta forma, estará com tensões residuais compressivas.

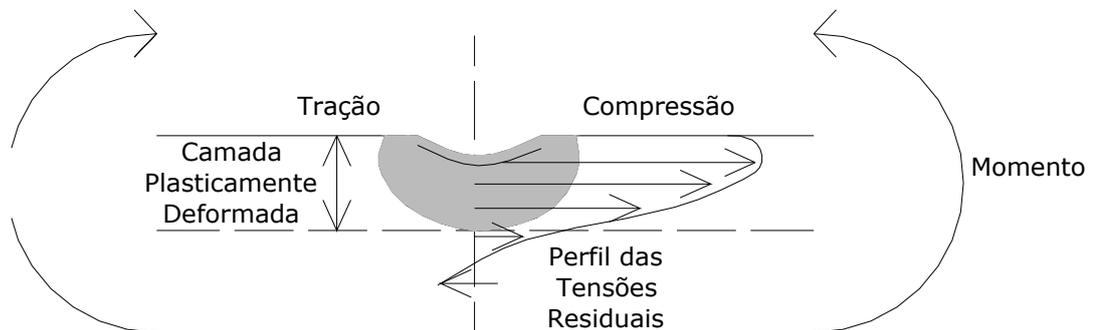


Figura 2-12 - Diagrama esquemático do perfil de tensões residuais em uma simples indentação causada pelo jateamento.

No jateamento, porém, alguns parâmetros devem ser controlados, tais como a granulometria das partículas e a pressão com que elas são arremessadas contra o componente a ser jateado, pois operações de jateamento excessivas poderão ocasionar trincas no material.

2.5.3 Trefilação

A trefilação pode ser definida como sendo um processo de fabricação por deformação plástica na qual há um tracionamento do fio-máquina (matéria-prima) através da ferramenta (fieira), ocasionando assim uma redução de área na seção transversal e aumento de comprimento. Uma das características principais do processo de trefilação é o excelente acabamento superficial e também a ótima precisão dimensional. A principal matéria-prima usada na trefilação de barras é o fio-máquina. As grandes vantagens do processo de trefilação são o ganho de resistência mecânica no material, acabamento superficial e a alta velocidade do processo [Dieter, 1986]³³. Na prática industrial a redução de área na trefilação raramente ultrapassa os 30%.

A fieira pode ser dividida em quatro regiões distintas conforme a Figura 2-13 [Dieter, 2003]³⁴:

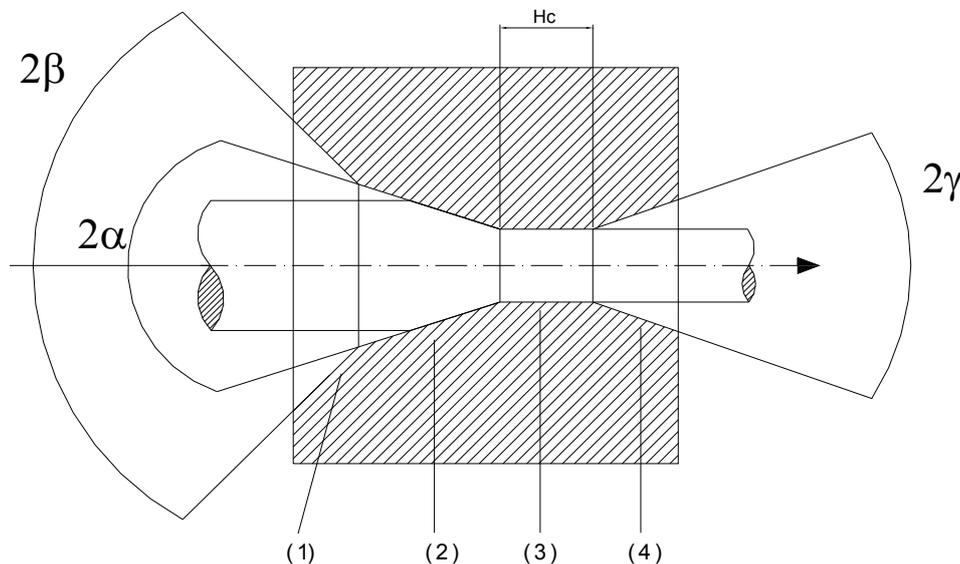


Figura 2-13 - Representação esquemática da ferramenta de trefilação (fieira) e suas quatro regiões principais.

Região de entrada (1): a região de entrada tem como objetivo o guiamento do material (fio-máquina) a ser trefilado e também facilitar o processo de lubrificação, para o correto guiamento do material a fieira tem um ângulo de entrada definido como sendo o ângulo 2β , este ângulo é ligeiramente maior que o ângulo da região de trabalho.

Região de trabalho (2): a região de trabalho tem como objetivo deformar plasticamente o material que está sendo trefilado, esta deformação ocorre pelo escoamento do material devido a limitação de diâmetro dada pela ferramenta (fieira). Um fator importante nesta região é o ângulo 2α , pois a força para trefilação de um material está diretamente relacionada a este ângulo, levando-se em conta que os outros parâmetros do processo sejam constantes. Os ângulos mais comuns estão entre 5° e 30° , dependendo do tipo de material a ser trefilado e também do grau de redução.

Região de calibração (3): esta região define a geometria e as dimensões do material que está sendo trefilado. Esta região é paralela em relação ao fio-máquina que está sendo trefilado. Esta região é fundamental para assegurar a estabilidade dimensional do produto trefilado.

Região de saída (4): após o material ser deformado plasticamente há um retorno elástico pelo alívio das tensões compressivas aplicadas nas regiões (2) e (3). Assim, na região de saída, o material sofre uma recuperação elástica havendo um leve aumento de diâmetro. Nesta região há um ângulo de saída (2γ) que é contrário aos ângulos das regiões de entrada e de calibração facilitando assim a saída do material.

A trefilação como processo de conformação mecânica é explicada através de modelos teóricos há apenas 60 anos [Dieter, 1986]³³. Através das noções teóricas é possível, atualmente, prever por antecipação as forças necessárias. Pode-se avaliar o efeito da geometria da ferramenta (fieira) ou as tensões que atuam na zona de deformação.

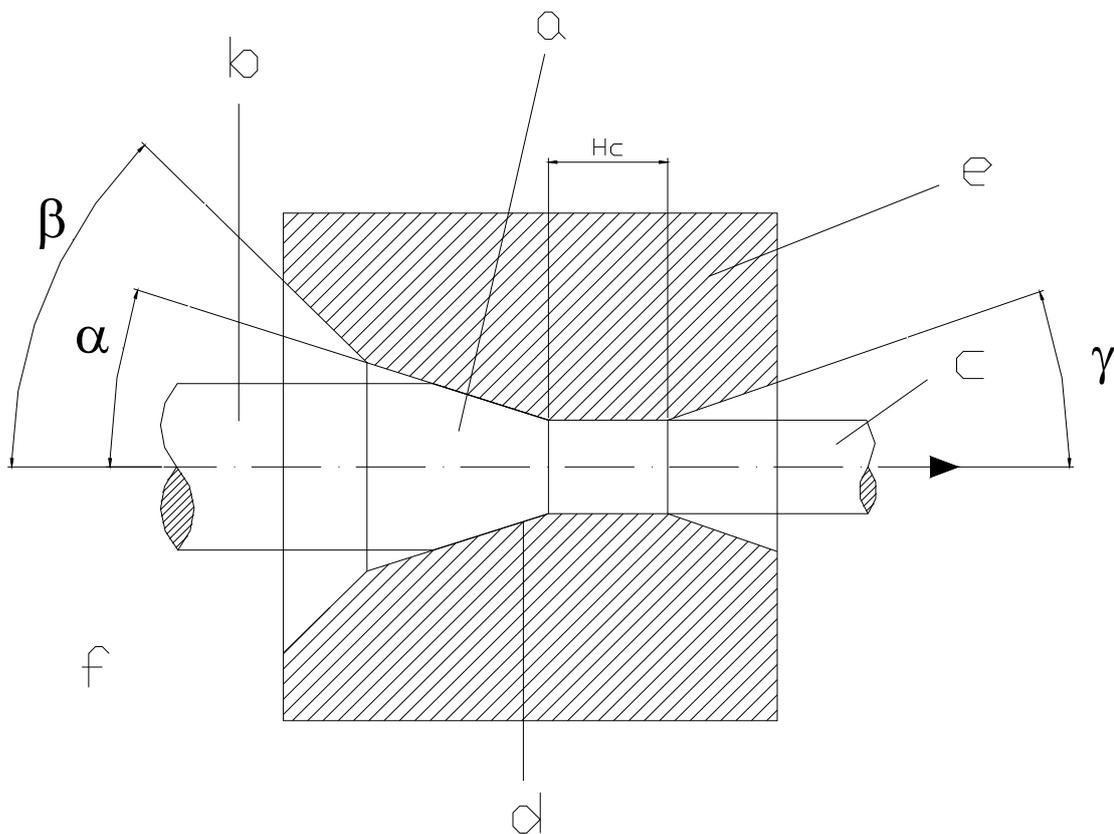


Figura 2-14 - Representação do processo de trefilação.

Na Figura 2-14 são representadas as principais zonas de ferramenta e do ambiente envolvido no processo de trefilação [Lange, 2002]¹⁰².

- Zona (a) – a zona (a) refere-se ao comportamento plástico do material que será trefilado. Utilizando os conceitos da teoria elementar da plasticidade e as propriedades mecânicas e físicas do material a ser trefilado, podem-se determinar as tensões aplicadas no processo e deformações.

- Zona (b) – esta zona refere-se às propriedades da matéria-prima (fio-máquina) antes de ser trefilado, pois após a deformação as propriedades do material acabam alterando-se pelo trabalho mecânico e deformações impostas no processo. As propriedades finais da barra trefilada estão relacionadas fundamentalmente às propriedades do fio-máquina, tais como tamanho de grão, inclusões, microestrutura e também aspectos macroscópicos, tais como, qualidade superficial do fio-máquina e erros de forma provenientes da laminação do fio-máquina.
- Zona (c) – esta região refere-se às propriedades da barra trefilada, tais como: propriedades mecânicas, propriedades superficiais e qualidades dimensionais e geométricas. Estas propriedades podem ser diretamente interligadas à matéria-prima e também ao grau de redução durante a trefilação que afetarão as propriedades mecânicas do produto final. Pode-se também relacionar qualidade superficial final com o acabamento da feira bem como o estado inicial do fio-máquina, imperfeições no fio-máquina, tais como, oxidação, carepas, acabamento superficial, afetarão diretamente as propriedades do produto final.
- Zona (d) – esta região refere-se aos fenômenos relacionados com a interface ferramenta e o material a ser conformado. Os principais parâmetros envolvidos são: atrito, lubrificação, acabamento superficial da ferramenta e desgaste da ferramenta.
- Zona (e) – refere-se ao dimensionamento da ferramenta, que irá influenciar diretamente na qualidade dimensional final do produto trefilado.
- Zona (f) – refere-se ao meio onde ocorre o processo de conformação e as interações de matéria-prima, por exemplo, a oxidação que ocorre em processos a quente, ou ainda, a potência do equipamento que deve ser suficiente para efetuar o processo. Também um aspecto importante é a montagem do ferramental com um correto alinhamento objetivando-se minimizar esforços e obter um bom produto final.

O processo de trefilação obedece à lei de constância de volume. Pode-se obter uma relação de áreas (diâmetros) e comprimentos do fio-máquina (matéria-prima) e a barra trefilada (produto final). Esta relação é representada a seguir [Lange, 2006]³⁵:

$$L_f = L_i \frac{A_i}{A_f} = L_i \left(\frac{D_i}{D_f} \right)^2 \quad \text{(Equação 1)}$$

A relação apresentada acima, correlaciona o comprimento final (L_f) com o comprimento inicial (L_i) e as relações de área inicial (A_i) e final (A_f), ou ainda os diâmetros inicial (D_i) e final (D_f), obtendo-se assim uma relação constante de volume.

O conhecimento das tensões aplicadas durante o processo de trefilação é relevante no ponto de vista prático [Altan, 1999]³⁶. O conhecimento das tensões aplicadas no processo são importantes na otimização do processo, bem como na confecção do projeto das ferramentas (fieira).

Ao ser trefilada em temperatura ambiente ocorre o encruamento do material devido à deformação plástica a frio induzida na matéria-prima. O encruamento é causado pela interação das discordâncias no material criando barreiras que impedem seu movimento na rede cristalina, aumentando assim a resistência mecânica do material. O aumento de resistência pode ser explicado pelo fato desta interação causar um empilhamento de discordâncias causando uma tensão de reação oposta à tensão aplicada no plano de deslizamento [Dieter, 1986]⁴.

2.5.3.1 Trefilação – tensões

Durante o processo de trefilação de barras cilíndricas, os esforços presentes na ferramenta (fieira), podem ser representados segundo a Figura 2-15. Nesta figura os esforços de tração em relação ao eixo X, são representadas pelo símbolo σ_t . As tensões radiais compressivas da ferramenta no fio-máquina estão representadas pelo símbolo σ_r , e são devidas à reação da ferramenta ao movimento axial do fio-máquina. O atrito entre o fio-máquina e a ferramenta também exerce um papel fundamental no esforço final do sistema, sendo representado pelo símbolo τ .

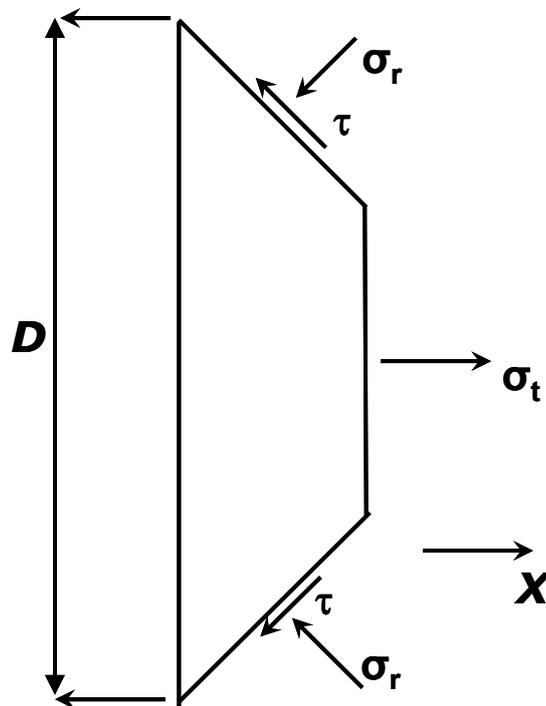


Figura 2-15 – tensões durante a trefilação.

2.5.3.2 Trefilação – Cálculo da força

Existem vários modelos matemáticos para o cálculo da força de trefilação. Um dos mais utilizados é o modelo de Siebel, equação 2 [Siebel, 1956]³⁹, onde a força de trefilação (F) pode ser calculada a partir da área inicial do fio-máquina (A_0) e final (A_1), da resistência média ao escoamento (K_{fm}), do atrito entre a ferramenta e o fio-máquina (μ) e do ângulo de ferramenta (α). A partir da equação de Siebel, pode-se estimar as tensões aplicadas durante o processo de trefilação. Apesar da simplicidade da formulação, o cálculo preciso nem sempre é simples, pois envolve a determinação do coeficiente de atrito, sendo este parâmetro do processo de difícil determinação. A equação de Siebel pode ser dividida basicamente em três termos, sendo que o primeiro termo (equação 3) descreve a deformação homogênea no processo, o segundo termo (equação 4) descreve a deformação não homogênea devida ao trabalho redundante e o terceiro termo (equação 5) descreve a contribuição do atrito [Mang, 2007]³⁸.

$$F = A_1 K_{fm} \left[\ln \left(\frac{A_0}{A_1} \right) + \left(\frac{2\alpha}{3} \right) + \left(\frac{\mu}{\alpha} \ln \left(\frac{A_0}{A_1} \right) \right) \right] \quad \text{(Equação 2)}$$

$$F = A_1 K_{fm} \left[\ln \left(\frac{A_0}{A_1} \right) \right] \quad \text{(Equação 3)}$$

$$F = A_1 K_{fm} \left[\left(\frac{2\alpha}{3} \right) \right] \quad \text{(Equação 4)}$$

$$F = A_1 K_{fm} \left[\left(\frac{\mu}{\alpha} \ln \left(\frac{A_0}{A_1} \right) \right) \right] \quad \text{(Equação 5)}$$

2.5.3.3 Parâmetro Δ .

O ângulo de trabalho na fiação provavelmente é o parâmetro mais importante a ser controlado na confecção de uma boa ferramenta de trefilação. O efeito deste ângulo no fluxo de material trefilado não pode ser apenas considerado a partir do nível de redução do processo. Desta forma foi introduzido o parâmetro Δ [Wistreich, 1958]⁴², que é definido pela razão entre o diâmetro (h) e o tamanho da região de contato entre o metal deformado e a ferramenta (L).

$$\Delta = \frac{h}{L} \quad \text{(Equação 6)}$$

No caso da extrusão, o tamanho da região de contato (L) é dada por $(h_o - h_1)/(2\text{sen}\alpha)$ e o diâmetro (h) é igual a $(h_o + h_1)/2$ assim:

$$\Delta = \frac{(h_o + h_1)\text{sen}\alpha}{(h_o - h_1)} \quad \text{(Equação 7)}$$

Para o processo de trefilação de eixo simétrico, h é o diâmetro, e a redução é dada por:

$$r = \frac{(d_o^2 - df^2)}{d_o^2} \quad \text{(Equação 8)}$$

Aplicando essa variável na equação acima obtemos:

$$\Delta = \frac{\text{sen}\alpha(1 + (1-r)^{1/2})^2}{r} \quad \text{(Equação 9)}$$

A partir das equações 6, 7, 8 e 9 podemos observar que, para o processo de trefilação, o parâmetro Δ é inversamente proporcional à redução no processo. Exemplificando, para uma baixa redução teremos um valor de Δ menor comparado a uma redução maior. E o valor de Δ também é diretamente proporcional ao ângulo da ferramenta. Assim, para ângulos maiores o valor de Δ aumenta.

A partir do parâmetro Δ podemos estimar a natureza das tensões residuais [Wang, 2002]⁴³, pois as tensões residuais dependem da forma da zona de deformação. Com valores de Δ iguais ou menores que 1, um exemplo prático seria uma redução com ângulo de ferramenta baixo, o padrão do fluxo do material é praticamente uniforme. Assim, observam-se menores tensões residuais geradas no perfil trefilado. Estas tensões residuais geradas no perfil são diretamente ligadas ao parâmetro Δ e sua magnitude aumenta ou diminui de acordo com a variação do ângulo de ferramenta. Entretanto, se o valor de Δ for extremamente alto as tensões residuais terão um comportamento totalmente diferente. Pode-se observar que, para pequenas regiões de contato, as deformações não penetram em uma profundidade alta no material e a tendência são que tensões residuais se mantenham na superfície do material com comportamento compressivo, conforme a Figura 2-16A [Nakagiri et al, 2001]⁴⁴.

Na Figura 2-16 (A) [Nakagiri et al, 2001]⁴⁴ observa-se um ângulo de feira muito acentuado e, conseqüentemente, uma área de contato baixa entre a ferramenta e o fio-máquina, levando-se em conta o diâmetro inicial do fio-máquina. Neste caso, a superfície do fio-máquina irá alongar-se muito mais do que o

núcleo do material, assim, teremos tensões residuais compressivas na superfície da barra trefilada e o núcleo com tensões trativas.

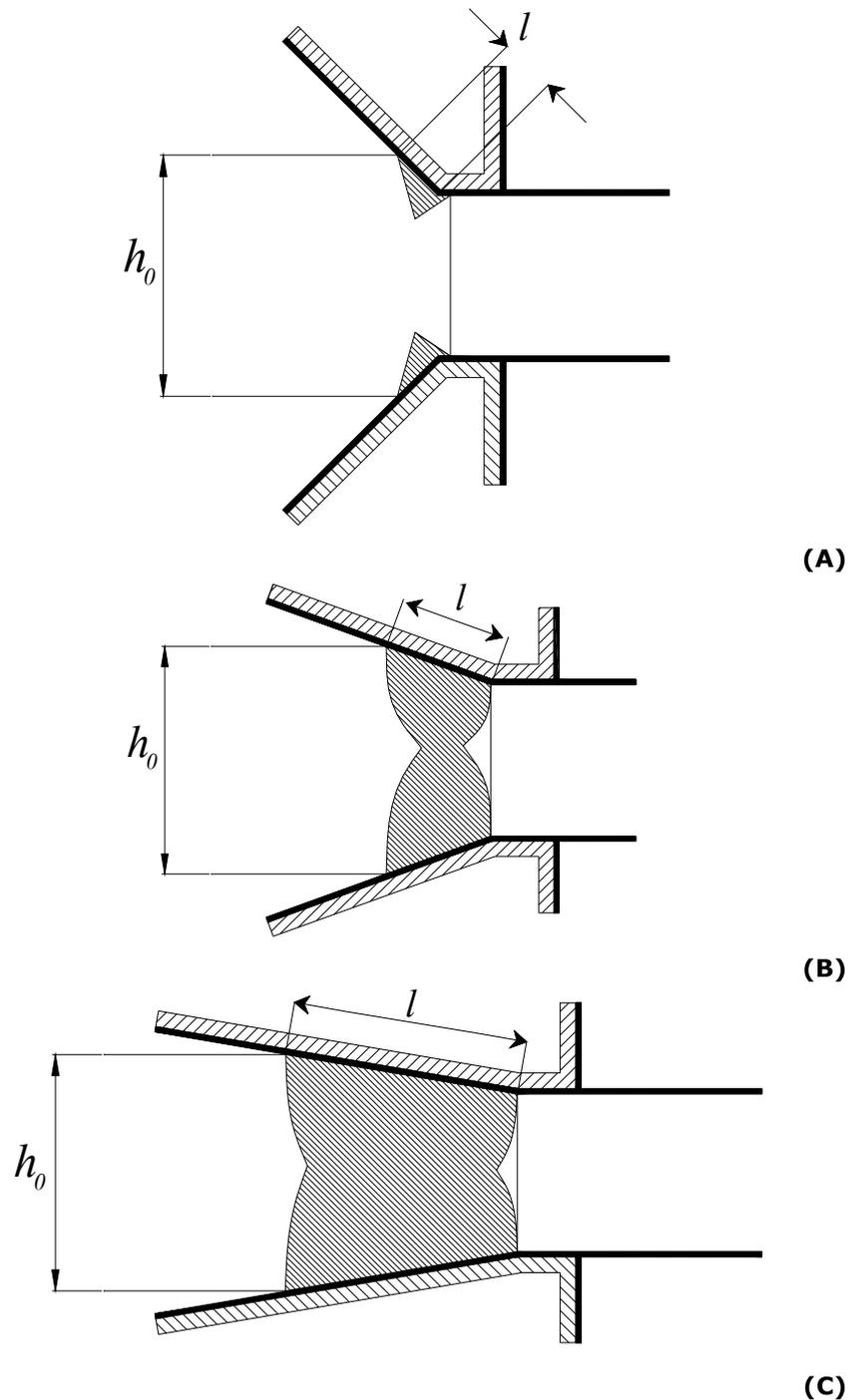


Figura 2-16 – Exemplos de penetração e distribuição da deformação plástica para diferentes ângulos de fieira.

Na Figura 2-16 (B) a zona de deformação plástica avança para o núcleo do fio-máquina, assim há uma maior deformação no núcleo do material se comparado com a superfície, desta forma, teremos o núcleo com tensões residuais compressivas e a superfície com tensões residuais trativas [Elices, 2004]⁴⁵.

Na Figura 2-16 (C) a zona de deformação plástica penetra a totalidade do fio-máquina, ocasionando assim diferenças menores entre o núcleo e a superfície do fio-máquina. Assim os valores de tensões axiais tendem a zero.

O ângulo de ferramenta (fieira) ideal é de aproximadamente 10° a 14° [Dieter, 2003]⁴⁶. Esta definição de ângulo ótimo para a fieira depende fundamentalmente de dois fatores, do componente de atrito e também do componente de trabalho redundante. O componente de atrito diminui com o aumento do ângulo de fieira, pois a área de contato entre o fio-máquina e a fieira é menor para ângulos mais agudos. Outro aspecto importante para a determinação do ângulo ideal de fieira é o trabalho redundante, com o aumento do ângulo de fieira, o trabalho redundante também aumentará. Ângulos menores que 10° são permitidos para sistemas onde o coeficiente de atrito do sistema é muito baixo, em um ângulo ótimo de fieira as contribuições de atrito e deformação não homogênea são de mesma magnitude.

2.5.3.4 Efeitos do parâmetro Δ nas tensões residuais.

A partir do parâmetro Δ podemos estimar a natureza das tensões residuais, pois as tensões residuais dependem da forma da zona de deformação. Portanto estas tensões residuais geradas no perfil são diretamente ligadas ao parâmetro Δ e sua magnitude aumenta ou diminuiu de acordo com que o ângulo de ferramenta varia conforme mostrado na Figura 2-17. Entretanto se o valor de Δ for extremamente alto as tensões residuais terão um comportamento totalmente diferente. Pode-se observar que para pequenas deformações e um ângulo de ferramenta elevado, as tensões residuais não penetram em uma profundidade alta no material e a tendência é que elas se mantenham na superfície do material com comportamento compressivo [Wang, 2002]⁴³.

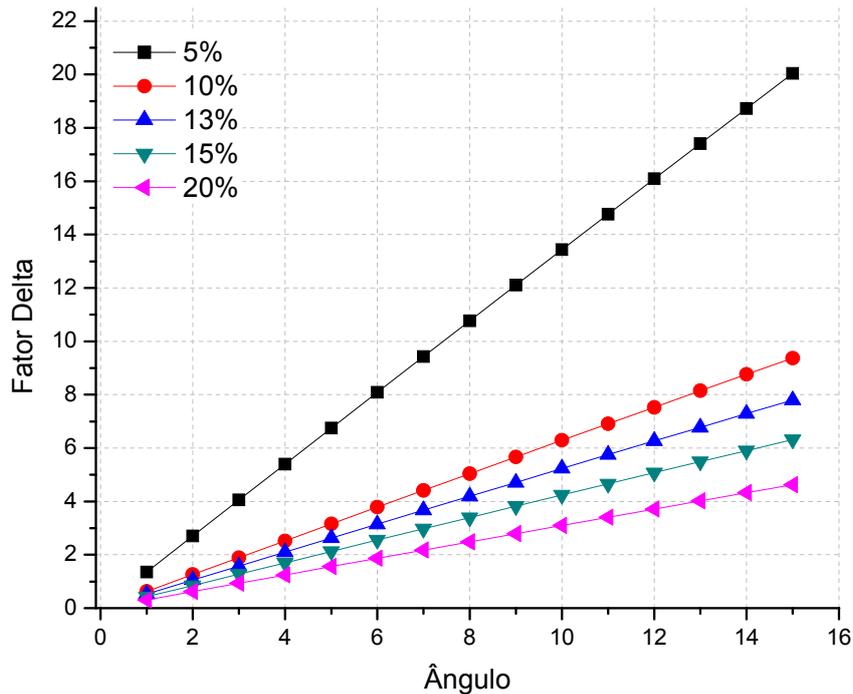


Figura 2-17 - Relação do fator delta com o ângulo de fieira para diversas reduções.

Baixos valores de Δ envolvem um trabalho de atrito alto entre a ferramenta e o material que está sendo trefilado. Desta forma, há um grande trabalho de atrito e também uma grande geração de calor durante o processo necessitando um lubrificante ótimo para reduzir o atrito entre a fieira e o fio-máquina. Valores de Δ menores resultarão em menor pressão sobre a fieira aumentando a vida útil da ferramenta e ocasionam um fluxo de metal mais uniforme. Este fluxo de metal mais uniforme reduz a pressão hidrostática sobre o fio-máquina prevenindo a formação de defeitos no núcleo do fio-máquina [Shemensky, 1999]¹⁰³.

Por outro lado, valores elevados de Δ envolverão perda de força no processo por trabalho redundante. Na prática, o trabalho redundante começa a existir a partir de valores de Δ superiores a 1 [Dieter, 2003]⁴⁶.

Na prática industrial o design da fieira incorpora uma zona de deformação com $\Delta \cong 3$ desta forma minimiza-se as tensões durante a trefilação [Shemensky, 1999]¹⁰³.

2.5.3.5 Ângulo de fieira ideal

O ângulo ótimo de fieira é o ângulo que minimiza a força. Para a determinação do ângulo ótimo de ferramenta, deve ser levado em conta a equação 3 (força devida a deformação homogênea), equação 4 (força devida ao trabalho redundante) e equação 5 (força devida ao atrito), onde calcula-se para cada equação as forças e plota-se um gráfico do semi-ângulo de ferramenta no eixo das abscissas e a força no eixo das ordenadas obtém-se o ângulo ideal de ferramenta onde a força de atrito e a força do trabalho redundante são iguais, minimizando assim a força de trefilação [Lange, 2006]⁴⁰. Um exemplo prático é apresentado utilizando os dados da Tabela 2-1.

Tabela 2-1 – Dados utilizados para o cálculo do semi-ângulo ideal de ferramenta, Fonte: [Schaeffer, 1999]⁴¹.

Material	Aço CK35
Ao	402,99 mm ²
A1	322,06 mm ²
$k_f = c.\varphi^n$	$k_f = 848\varphi^{0,1817}$
μ	0,05

A partir dos dados obtidos utilizando as equações 3, 4 e 5, os valores obtidos são mostrados na Figura 2-18. Para este exemplo, o semi-ângulo de feira ótimo é próximo de 7,3°.

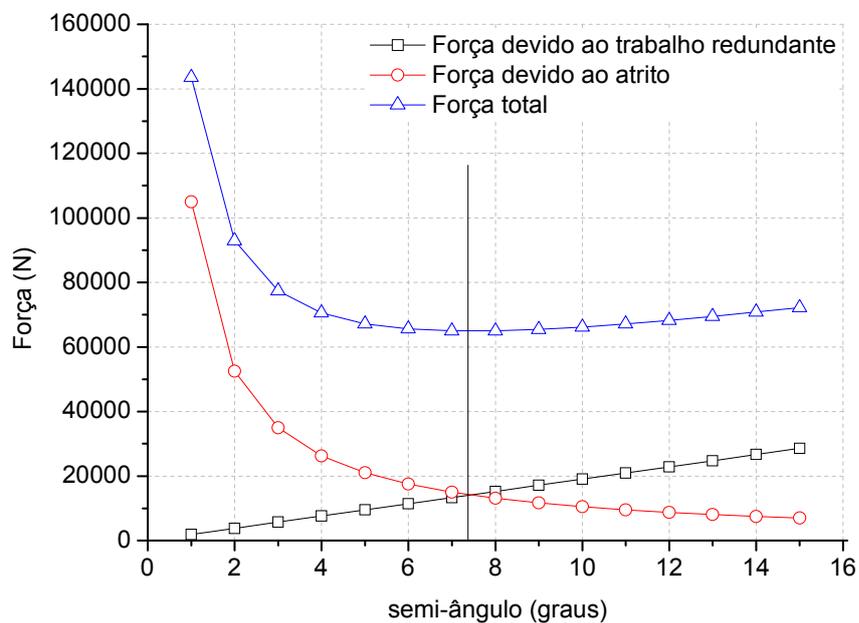


Figura 2-18 - Determinação do semi-ângulo ótimo de ferramenta.

2.5.3.6 Tensões residuais durante a trefilação.

Conforme definido na seção 2.5.3.1, a trefilação é um processo de fabricação por deformação plástica na qual há um tracionamento do fio-máquina (matéria-prima) através da ferramenta (fieira), ocasionando assim uma redução de área na seção transversal e aumento de comprimento. Uma das características principais do processo de trefilação é o excelente acabamento superficial e também a ótima precisão dimensional.

As tensões residuais dependem do nível de redução. Para passes de redução menores que 1%, as tensões residuais longitudinais e circunferenciais são compressivas na superfície do material e trativas no núcleo. As tensões residuais radiais são trativas no eixo chegando a zero na superfície. Industrialmente as reduções são mais elevadas, sendo comumente encontrados valores de redução entre 10-20%. Neste caso o

comportamento muda ficando o inverso do comportamento anterior, as tensões longitudinais e circunferenciais são trativas na superfície e as tensões residuais radiais são compressivas no eixo [Dieter, 1981]⁴⁷.

Se uma barra com tensões residuais for colocada em serviço com um carregamento externo, a tensão aplicada a esta barra irá superpor-se às tensões residuais. Portanto, a tensão total aplicada sobre a barra será maior que a força do carregamento externo, diminuindo assim a vida em fadiga do material. Há também nestas tensões residuais na superfície do material um efeito maléfico aumentando a suscetibilidade à corrosão sob tensão do material.

As tensões residuais da barra acabam influenciando no comportamento mecânico e sua durabilidade diminui. Como podemos constatar em outros estudos, a presença de tensões residuais reduz o limite elástico [Atienza, 2003]⁴⁸ [Atienza, 2004]⁴⁹.

Uma análise das tensões residuais pode ser feita por elementos finitos (FEM). As tensões residuais nos processos de trefilação em um único passe não dependem apenas da redução e do ângulo da ferramenta, depende também deformação que há pela passagem do fio-máquina após a fieira. Como um exemplo prático [Wang, 2002]⁵⁰, a Figura 2-19 mostra a influência da deformação e da redução de área (ϵ_a). Foram medidos quatro componentes das tensões residuais: axial, radial, tangencial e o nível de tensões residuais equivalente. Os parâmetros usados são mostrados na Tabela 2-2:

Tabela 2-2 – Parâmetros de processamento do material:

Material:	Aço CK15
Ângulo de ferramenta:	$2\alpha=25^\circ$
Diâmetro final:	$d_1=15\text{mm}$
Redução de área:	ϵ_a

Tomando a redução de área em 18%, nesta condição as tensões residuais axiais medidas no núcleo do material têm caráter compressivo e na superfície do material é trativa. Para uma redução de 10% as tensões residuais na superfície aumentam em relação a outras reduções, porém, o valor é menor no núcleo do material para reduções menores.

Sabendo-se do efeito prejudicial das tensões residuais, e tentando minimizar este efeito, tenta-se reduzi-las usando-se tratamentos térmicos após a trefilação. A grande desvantagem de se usar tratamentos térmicos após o processo de trefilação é que há mais uma etapa no processo consumindo tempo e também aumentando o valor do produto, tornando-o menos competitivo. Estes tratamentos muitas vezes são empíricos e pouco se sabe a respeito das tensões residuais após estes tratamentos. Utilizando parâmetros corretos é possível diminuir as tensões residuais dos materiais trefilados, principalmente controlando a região de deformação maior no processo (fieira) ou ainda deformações adicionais que poderão ser favoráveis ao material, diminuindo consideravelmente as tensões residuais [Wang, 2002].

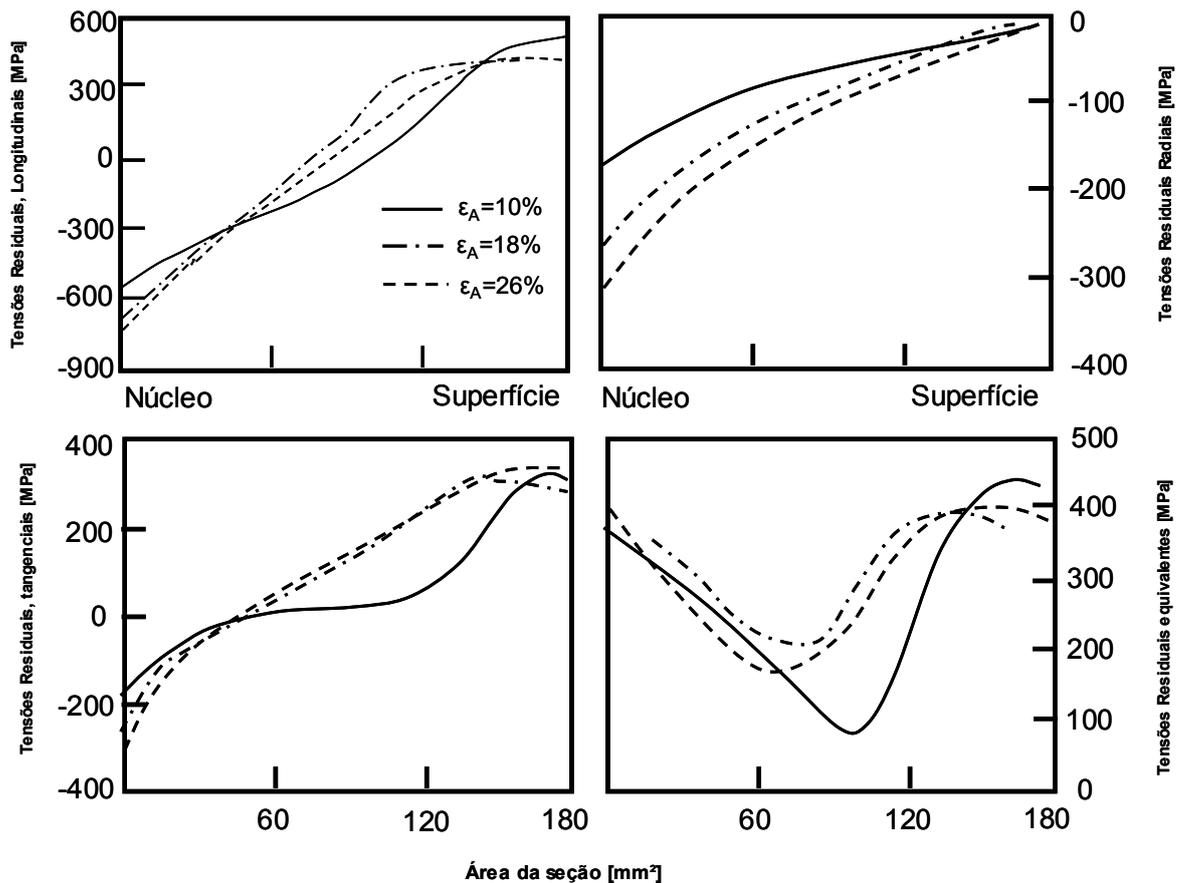


Figura 2-19 - Influência da redução nas tensões residuais após a trefilação. Adaptado de ASM Handbook of residual stress.

2.5.4 Processo de polimento e endireitamento por rolos cruzados (PTN).

O endireitamento e polimento por rolos cruzados, conhecidos comercialmente como PTN, mostrado na Figura 2-20 é uma das etapas mais importantes durante a trefilação combinada, pois este estará fazendo as últimas deformações durante o processo e assim induzindo as tensões residuais no produto final. Este equipamento é composto por dois rolos um rolo côncavo e outro convexo com um ângulo entre eles denominado δ , este ângulo pode variar de 10-20° dependendo das propriedades do material a ser endireitado e polido. A barra trefilada a ser endireitada e polida é projetada no meio destes rolos. O rolo côncavo é responsável pelo polimento da barra enquanto o rolo convexo induz a baixa deformação plástica superficial.

A manufatura de barras trefiladas segue normas e padrões de qualidade superficial, propriedades mecânicas e tolerâncias em relação ao empenamento final da barra. Alguns parâmetros do equipamento de endireitamento podem ser ajustados, estes parâmetros são [Rivolta et al, 2004]⁵¹:

- Velocidade angular dos rolos: as velocidades dos rolos podem ser variadas, e a velocidade com que a barra é polida e endireitada é considerada como sendo a mesma velocidade angular dos rolos.

- **Ângulo dos rolos:** a disposição dos rolos inferior e superior não são em linha com relação a linha central da barra trefilada, a posição dos rolos induz na barra um movimento helicoidal. Aumentado-se o ângulo entre o rolo inferior e superior a velocidade angular da barra também aumenta, enquanto a velocidade angular da barra tende a zero se os rolos estão dispostos paralelamente (o que não ocorre na prática).
- **Pressão dos rolos:** existe no sistema de rolos côncavo e convexo uma distância, e esta distância determina a pressão que os rolos irão exercer na barra.

O equipamento de PTN é usado comercialmente na trefilação combinada sendo uma etapa posterior a etapa de corte da barra (após a trefilação). As barras ao passar por estes rolos de endireitamento sofrem uma pequena deformação superficial, induzida pelo rolo convexo, que induz tensões residuais compressivas em sua superfície, e este nível de tensões residuais compressivas induzidos pode mudar o comportamento do nível de tensões residuais presentes nas barras trefiladas, passando de trativo na superfície para compressivo dependendo do ângulo com que estão posicionados estes rolos. Os ângulos comerciais mais usuais estão na faixa de 11° a 20°. Este processo apresenta uma grande vantagem em relação à aplicação de tratamentos térmicos para a eliminação destas tensões trativas presentes na superfície da barra após a trefilação, pois ele já está inerente ao processo e seu objetivo inicial é somente o endireitamento e o polimento final da barra, etapa de acabamento, porém sendo usado de forma correta pode também exercer um papel fundamental na mudança do nível de tensões residuais presentes nas barras trefiladas.

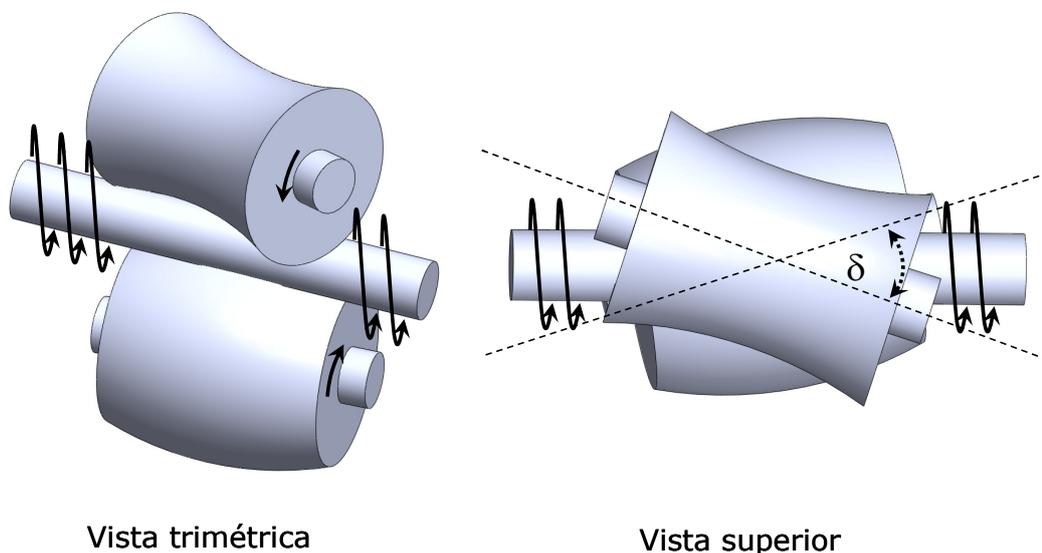


Figura 2-20 - Desenho esquemático dos rolos cruzados de endireitamento e polimento (PTN).

3 MÉTODOS DE MEDIDA DE TENSÕES RESIDUAIS

3.1 Técnicas de medida de tensões residuais

Nos últimos anos, várias técnicas de medição das tensões residuais foram desenvolvidas. Podemos classificar estas técnicas em dois grandes grupos: as medições destrutivas e não destrutivas. Para o caso de medições destrutivas, o objetivo principal desta técnica é que o componente esteja no estado de equilíbrio e, destruindo este estado de equilíbrio, pode-se fazer a medida das tensões residuais do componente em questão fazendo-se um relaxamento destas tensões. Porém, para este método só é possível fazer a medida da consequência da relaxação das tensões residuais e não a própria relaxação. As técnicas de medição destrutivas mais comuns são [Lu, 1986]⁵²:

- Método do furo cego;
- Método da deflexão;
- Ring core;

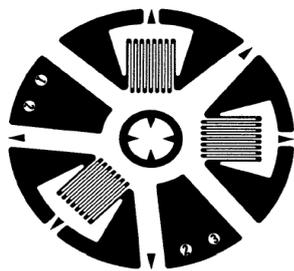
Os métodos não destrutivos são baseados na relação entre as propriedades cristalográficas ou físicas do material em relação as tensões residuais. O método de difração de raios-X, nêutrons, ultra-sônico e magnético são os mais comumente utilizados. A difração de raios-X e nêutrons são baseados na medida da tensão no retículo cristalino em relação ao espaçamento interplanar de um material policristalino. O método da difração de raios-X mede as tensões residuais na superfície. Este método tem excelente precisão, porém uma de suas desvantagens é o fato de só permitir a análise das tensões residuais na superfície do componente a ser analisado e também à portabilidade do equipamento que impedem medidas em campo. O método de difração de nêutrons mede as tensões residuais em relação ao volume da amostra, medindo da mesma forma que o método por raios-X a medida dos espaçamentos interatômicos [Lu, 1986]⁵².

3.1.1 Método do furo cego

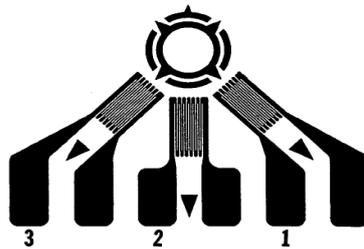
A técnica de medição das tensões residuais pelo método do furo cego foi proposta nos anos 30 do século passado por J. Mathar e é baseada na medida da mudança da tensão na superfície do material causada pelo alívio da tensão em um material a ser analisado onde foi feita a usinagem de um furo na superfície. O método ainda é um dos mais utilizados para medida das tensões residuais, por se tratar de uma técnica relativamente simples rápida e versátil [Kandil, 2001]⁵³, podendo-se aplicar a uma vasta gama de materiais e componentes. A normalização do processo de medida é seguida pela ASTM E-837. Este método é considerado semi-destrutivo, já que da peça a ser ensaiada não é inutilizada, já que o volume de material retirado é pequeno, não afetando a sua utilização posterior. Esta técnica apresenta algumas limitações

necessitando uma boa preparação da amostra e também um ótimo alinhamento do furo e um controle de sua profundidade, estes fatores citados são os maiores causadores de erros durante os ensaios.

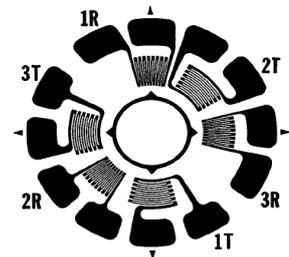
O método consiste basicamente na instalação de extensômetros de três braços, mais conhecidos como rosetas, na área a ser analisada, sendo o princípio básico de extensimetria elétrica. Após a fixação com adesivos apropriados deve-se ter um intervalo para a cura do adesivo, após esta cura, é feito um furo cego de diâmetros que podem variar conforme o tipo de material a ser analisado. A teoria básica do método é que após a realização de um furo no material que está tensionado, ele irá aliviar estes esforços na vizinhança do furo, então a medida das deformações associadas é feita usando os extensômetros.



ROSETA TIPO A



ROSETA TIPO B



ROSETA TIPO C

Figura 3-1 - Tipos de roseta - A - B - C.

Os modelos mais usuais de rosetas conforme a norma ASTM E-837 são mostrados na Figura 3-1 [ASTM E-837, 2002]⁷⁷, a roseta do tipo A é mais indicada para uso geral, a roseta de tipo B é indicada para uso onde há obstáculos, tais como cordões de solda ela também apresenta uma sensibilidade maior que a roseta tipo A em torno de 6% a 12%. A roseta do tipo C é recomendada para situações onde é necessária grande sensibilidade e também estabilidade térmica. O aumento de sensibilidade de uma roseta tipo C em comparação com uma convencional é de 70% a 140% [Grant et al, 2001]⁵⁴. Um dos fatores mais importantes na seleção do strain-gage é o seu tamanho, e a relação do tamanho do strain-gage está diretamente relacionada com o tamanho da área disponível para fazer a medida das tensões residuais. Também há o fato de menores strain-gages necessitarem furos menores, afetando em menor escala as tensões residuais no material. Porém strain-gages menores também são responsáveis por erros experimentais maiores nas medidas devido à maior dificuldade de controlar o tamanho do furo e também o diâmetro, há o aspecto de que strain-gages maiores acabam necessitando furos maiores e esta grande quantidade de material retirado durante a perfuração requer uma manipulação cuidadosa [Lu, 1996]⁶⁵.

3.1.1.1 Preparação da superfície e furo

Norma ASTM E-837 recomenda que o furo seja feito em pequenos incrementos de profundidade, ao mesmo tempo em que são gravadas as deformações do material e também medida a profundidade de cada

incremento. Este procedimento é necessário para julgar se as tensões residuais são uniformes com a profundidade do material, caso não seja feito este procedimento não há meios de saber se as tensões residuais são uniformes ou não no material.

A preparação da superfície deve ser sempre feita por um técnico devidamente treinado, pois esta etapa está diretamente ligada ao bom resultado do ensaio. O ideal para se ter bons resultados é que a superfície a ser analisada tenha um pH 7.0, tenha uma rugosidade adequada e esteja quimicamente limpa [Grant et al, 2002]⁵⁵. Os passos de preparação da superfície são os seguintes [Vishay, 1999]⁵⁶:

- Desengraxe por solvente.
- Polimento da superfície, para promover uma superfície com rugosidade adequada.
- Instalação do strain-gage.
- Condicionamento da superfície, para remoção de qualquer impureza.
- Neutralização, para retornar a alcalinidade perto de pH 7.0 e 7.5.
- Após a preparação da superfície o procedimento básico do teste é o seguinte:
 - Instalação dos strain-gages (roseta) e a instrumentação.
 - Alinhamento e ajustes do dispositivo elétrico.
 - Estabelecer a altura "zero".
 - Perfurar o material.
 - Gravação das tensões em cada incremento do furo.
 - Cálculo do estado inicial das tensões residuais a partir dos dados obtidos.

A norma ASTM E-837 recomenda efetuar o furo em pequenos incrementos e gravando as tensões obtidas, desta forma podemos medir se as tensões residuais são constantes em todo material. Nesta técnica há duas variáveis críticas para se ter uma boa medida: a primeira é como será feito o furo e todo cuidado de alinhamento e a segunda incerteza é de como os dados gerados nas medidas serão analisados.

Os fatores relacionados a estas variáveis são os seguintes [Grant et al, 2002]⁵⁷:

- Planejamento das medidas.
- Seleção dos strain-gages.
- Preparação da superfície e instalação do strain-gage.
- Instrumentação.
- Alinhamento.

- Tamanho da broca e do furo.
- Afastamento do furo.
- Detecção da profundidade zero
- Perfuração.
- Medida da tensão.
- Medida das dimensões do furo.

O cálculo das tensões residuais leva em conta que o furo realizado deverá ter lados paralelos, fundo liso e a limpeza do furo, o que na prática nem sempre acontece. Isso varia de acordo com o material a ser ensaiado e parâmetros usados no momento da realização do furo, ocasionando geometrias diferentes. As geometrias típicas dos furos são mostradas na Figura 3-2 [Grant et al, 2002]⁵⁸:

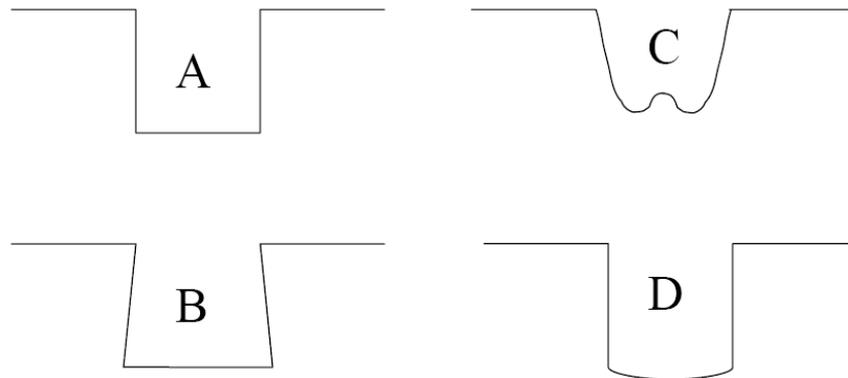


Figura 3-2 - A- Perfuração em alta velocidade, B- Perfuração em baixa velocidade, C- Usinagem por jato de ar, D- Usinagem química.

3.1.1.2 Cálculo de tensões residuais a partir das deformações – Método de Kockelmann.

O método de Kockelmann é baseado de dados experimentais de calibração. Esta depende da geração de funções de calibração para determinar o perfil de distribuição das tensões residuais a partir das deformações lidas pelo extensômetro utilizando-se como referência a variável adimensional ξ , resultado da fração entre a profundidade (z) e o diâmetro do furo (D_0), conforme mostrado na equação 10.

$$\xi = \frac{z}{D_0} \quad \text{(Equação 10)}$$

A realização da calibração é feita utilizando um corpo-de-prova sujeito a um estado de tensões conhecido, por exemplo, um carregamento uniaxial assim gera-se as funções de calibração $\sigma_{c,x}(\xi)$ e $\sigma_{c,y}(\xi)$. A partir do processo incremental de furação para o qual resultam as deformações de relaxamento $\varepsilon_{c,x}(\xi)$ e $\varepsilon_{c,y}(\xi)$,

geram-se as funções de calibração $K_x(\xi)$ e $K_y(\xi)$ a partir da equação 11. Para a realização da calibração são necessários apenas dois extensômetros, dispostos no sentido das tensões principais envolvidas.

$$K_x(\xi) = \frac{\frac{d\varepsilon_{c,x}(\xi)}{d\xi} \cdot \sigma_{c,x}(\xi) - \frac{d\varepsilon_{c,y}(\xi)}{d\xi} \cdot \sigma_{c,y}(\xi)}{\frac{1}{E} [\sigma_{c,x}^2(\xi) - \sigma_{c,y}^2(\xi)]} \quad (\text{Equação 11})$$

Para o cálculo das tensões residuais é necessário medir-se as deformações em três direções diferentes e conhecidas, atuando no mesmo plano. Assim, pode ser provado analiticamente que as tensões residuais principais apresentam a relação com a deformação radial medida nos três extensômetros descrita pela equação 12. Nesta equação σ_{\max} e σ_{\min} são as tensões residuais principais e ε_1 , ε_2 e ε_3 são as deformações relativas e \bar{A} e \bar{B} são as constantes de calibração.

$$\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} = \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}{4\bar{A}} \pm \sqrt{\frac{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2}{4\bar{B}}} \quad (\text{Equação 12})$$

O método de cálculo das tensões residuais é apresentado na equação 13, segundo Kockelmann e o cálculo das direções das tensões residuais máximas principais é apresentado na equação 14.

$$\frac{\sigma_{\max}(\xi)}{\sigma_{\min}(\xi)} = \frac{\sigma_a(\xi) + \sigma_b(\xi)}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_a(\xi) - \sigma_b(\xi))^2 + (\sigma_c(\xi) - \sigma_b(\xi))^2} \quad (\text{Equação 13})$$

$$\beta(\xi) = \frac{1}{2} \arctan \frac{2\sigma_b(\xi) - \sigma_a(\xi) - \sigma_c(\xi)}{\sigma_a(\xi) - \sigma_c(\xi)} \quad (\text{Equação 14})$$

O método de Kockelmann apresenta vantagens em relação aos métodos convencionais, tais como o método da integral em relação a erros de instrumentação e medição, sendo menos sensível a estes erros e apresentando assim dados mais confiáveis [Kockelmann & Schwarz, 1993]⁵⁹.

3.1.2 Método de difração por raios-X.

O método de difração de raios-X apresenta uma boa opção para medição de tensões residuais com a preservação da amostra. Esta técnica foi desenvolvida nos anos 20 por Lester e Aborn, e aperfeiçoada nos anos 30 por Sachs e Weerts. A técnica de raios-X pode ser aplicada em materiais cristalinos com pequeno

tamanho de grão. A técnica de difração de raios-X permite a medição de macrotensões com medições não destrutivas de tensões residuais superficiais, determinação da distribuição das tensões residuais sub-superficiais e também medição de tensões residuais relativas a falhas por fadiga ou associadas à corrosão sob tensão. Esta técnica também permite a realização de medições de microtensões possibilitando a medidas de microdureza para pequenas camadas superficiais.

A preparação geralmente não é necessária para a difração de raios-X, e o tamanho da amostra está limitada ao tamanho do porta-amostras do equipamento de raios-X.

Apesar de ser um ótimo método na determinação de tensões residuais, a difração de raios-X tem alguns fatores limitantes, sendo estes [Fitzpatrick & Fry, 2005]⁶⁰:

- Equipamento complexo e de alto valor agregado, apenas uma pequena parte da superfície é medida com profundidades menores que 0.025mm.
- Para medições em profundidades maiores, é necessário fazer uma remoção de camadas utilizando-se para isto um ataque eletrolítico.
- As amostras devem ser policristalinas e não devem apresentar uma textura cristalina elevada.
- O tempo de análise por ponto pode ser elevado, chegando a 2 horas por ponto dependendo do equipamento utilizado.

3.1.2.1 Princípios da técnica.

Esta técnica é baseada no princípio de que quando um material é irradiado por raios-X monocromáticos, para um cristal perfeitamente alinhado os átomos são empacotados regularmente e a distância entre os planos cristalográficos é definida pelas características físicas do material. A tensão medida no retículo cristalino e as tensões residuais associadas são determinadas a partir de constantes elásticas assumindo uma distorção linear do retículo cristalino. A medida das tensões residuais pelo método de raios-X é feita a partir da contribuição de vários grãos do cristal e esta medida depende fundamentalmente da geometria de feixe que irá incidir na amostra bem como do tamanho de grão da amostra [Fitzpatrick & Fry, 2005]⁶⁰. A profundidade de penetração na amostra depende principalmente do tipo de ânodo usado no equipamento de raios-X, do tipo de material que será analisado e também do ângulo de incidência do feixe na amostra e esta medida é sempre próxima à superfície da amostra.

$$\lambda = 2d \sin \theta$$

(Equação 15)

A difração de raios-x pode ser usada para medir com precisão os espaçamentos do retículo cristalino utilizando a lei de Bragg (equação 15)[Lodini, 2003]⁶¹, onde, λ é o comprimento de onda da radiação usada,

θ é a metade do ângulo de espalhamento, e "d" é o espaçamento interplanar médio para uma dada reflexão de um material cristalino, conforme exemplificado na Figura 3-3 [Fitzpatrick & Fry, 2005]⁶⁰.

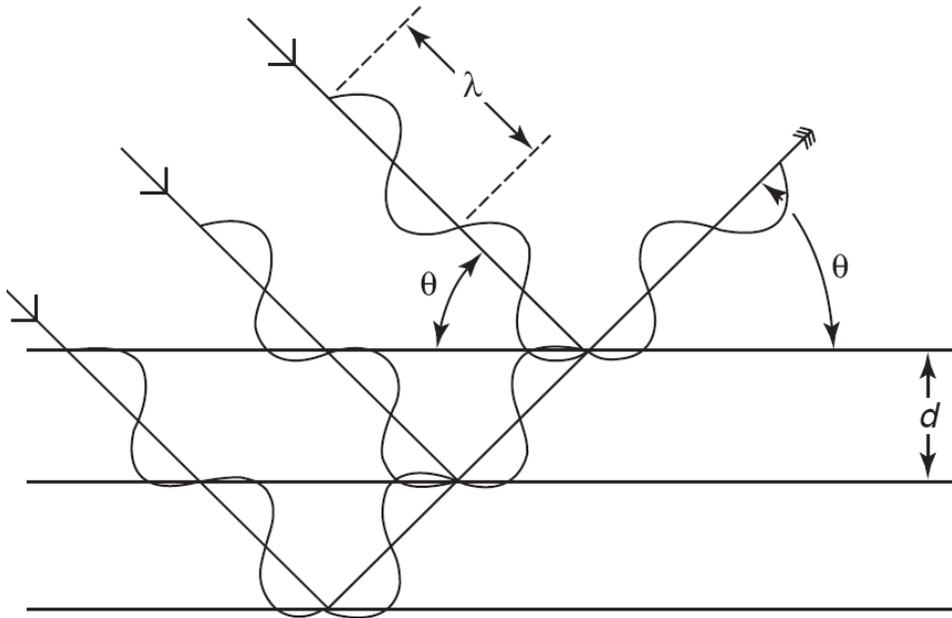


Figura 3-3 - Espalhamento e difração de raios-X em um arranjo cristalino.

Em um material com tensões residuais, o espaçamento pode ser usado como um strain-gage, dando a medida da deformação na direção do vetor de difração. Se d_0 são os espaçamentos do ângulo de Bragg medido para um material livre de tensões residuais, e tendo conhecimento prévio deste parâmetro, as tensões podem ser calculadas utilizando a equação 16.

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \frac{d_{\phi\psi} - d_0}{d_0} \quad \text{(Equação 16)}$$

O estado de tensões em alguma localização do material é o tensor de segunda ordem representada pelos componentes de tensão normais ao sistema de coordenadas dado. Pode-se determinar o estado de tensões no material usando difração utilizando as regras de como o componente de tensão de segunda ordem transforma com a direção. Tendo as componentes de tensão do material, as tensões residuais podem ser calculadas usando a lei de Hooke [Lodini, 2003]⁶², assim:

$$d_{\phi\psi} = \left[\left(\frac{1+\nu}{E} \right)_{(hkl)} \sigma_{\phi} d_0 \sin^2 \psi \right] - \left[\left(\frac{\nu}{E} \right)_{(hkl)} d_0 (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) + d_0 \right] \quad \text{(Equação 17)}$$

A Figura 3-4A [Prevéy, 1986]⁶⁶ mostra uma amostra na orientação $\Psi = 0$, a presença de tensões trativas resultam em um coeficiente de Poisson de contração, reduzindo assim o espaçamento do retículo cristalino,

e desta forma, aumenta o ângulo de difração, 2θ . Se amostra for rotacionada ao longo do ângulo Ψ , como demonstrado na Figura 3-4B, as tensões trativas presentes na superfície da amostra aumentam o espaçamento interatômico acima do estado livre de tensões e assim há um decréscimo do ângulo 2θ . Medindo a mudança em relação à posição angular do pico de difração definidos como ângulos Ψ , pode-se calcular as tensões na superfície da amostra [Prevéy, 1986]⁶³.

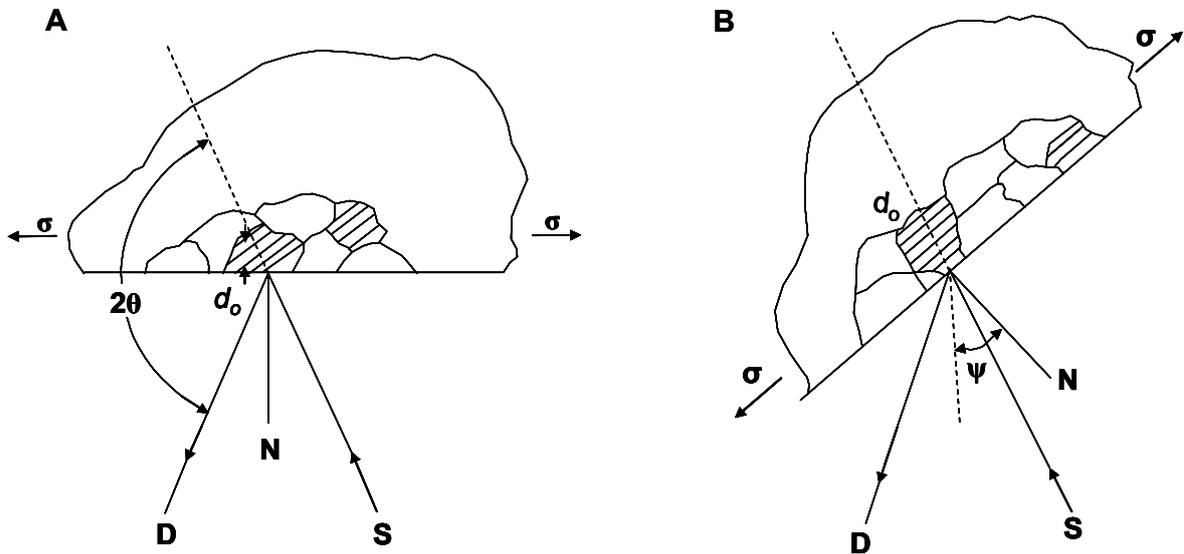


Figura 3-4(A-B) - Princípios de medição por difração de raios-X.

Na equação 18, $d_{\phi\psi}$ representa, d , na direção (Φ, ψ) , Φ é o ângulo entre a componente na direção x no plano da superfície e a direção da medida, ψ é o ângulo entre a direção normal à superfície e a direção da medida. A Equação 18 é a relação fundamental entre o espaçamento interplanar e o estado biaxial de tensões residuais na superfície de uma amostra cristalina para o método de difração de raios-X [Hauk, 1997]⁶⁴, [Lu, 1996]⁶⁵ e [Prevéy, 1986]⁶⁶.

Desta forma, plotando-se " d " contra $\sin^2 \psi$, nota-se que o intercepto desta curva segue a Equação 19:

$$d_{\phi\psi} = - \left[\left(\frac{\nu}{E} \right)_{(hkl)} d_0 (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) + d_0 \right] \quad \text{(Equação 18)}$$

Pode-se determinar o coeficiente angular da curva utilizando a equação:

$$\frac{\partial d_{\phi\psi}}{\partial \sin^2 \psi} = \left(\frac{1+\nu}{E} \right)_{(hkl)} \sigma_{\phi} d_0 \quad \text{(Equação 19)}$$

A qual pode ser solucionada para σ_{ϕ} (Equação 18):

$$\sigma_0 = \left(\frac{1+\nu}{E} \right)_{(hkl)} = \frac{1}{d_0} \left(\frac{\partial d_{\phi\psi}}{\partial \sin^2\psi} \right) \quad (\text{Equação 20})$$

Como $E \gg \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$, o valor de $d_{\phi 0}$ difere de d_0 em não mais do que 1%, deste modo, a Equação 20 adota a forma dada pela Equação 21:

$$\sigma_0 = \left(\frac{1+\nu}{E} \right)_{(hkl)} \frac{1}{d_{\phi 0}} \left(\frac{\partial d_{\phi\psi}}{\partial \sin^2\psi} \right) \quad (\text{Equação 21})$$

A Equação 19 torna a determinação das tensões residuais por difração de raios X um método diferencial onde nenhuma amostra livre de tensões residuais é necessária para determinar o estado biaxial de tensões residuais na superfície da amostra [Hauk, 1997]⁶⁷, [Lu, 1996]⁶⁸ e [Prevéy, 1986]⁶⁹.

A partir das equações descritas anteriormente, três métodos podem ser derivados para a determinação das tensões residuais através do Método de Difração de raios X: método do ângulo único, método de dois ângulos e método do $\sin^2\psi$.

A escolha do plano de difração para a realização da medição de tensões residuais é muito importante para a garantia de uma precisão de medida satisfatória. Ângulos de medição maiores garantem uma precisão de medida maior. Na prática estes ângulos de difração (2θ) são maiores que 120° .

3.1.2.2 Modelo de tensões plano elásticas.

As medições de tensões residuais estão limitadas à superfície da amostra, porém, pode-se utilizar meios para que haja uma remoção de material da superfície e assim, expor o material de camadas inferiores à superfície da amostra, tornando possível a medição em profundidades maiores. A técnica de eletropolimento (ataque eletrolítico) é uma possibilidade para a realização de medições em relação à profundidade. Na superfície exposta pelo ataque eletrolítico, assume-se um estado plano de tensões, onde a distribuição de tensões é descrita por σ_1 e σ_2 e o σ_3 na superfície da amostra é igual à zero conforme a Figura 3-5 [Prevéy, 1986]⁶⁹.

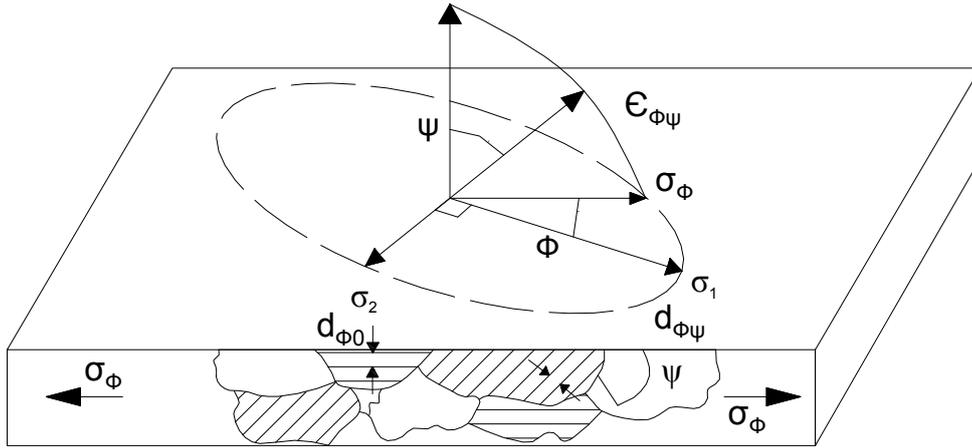


Figura 3-5 Modelo de tensões elásticas plano.

3.1.2.3 Método de remoção de camadas.

Na determinação de tensões residuais pelo método de difração de raios-X a penetração da medida do feixe é muito baixa e assim é necessária uma remoção de camadas utilizando um ataque eletrolítico para que se consiga medir em profundidades maiores que a superfície. Porém quando há uma remoção de camadas do material, um novo estado de tensões forma-se no material, e para que os resultados sejam coerentes com o estado de tensões original do material, é necessária uma correção dos valores medidos. O método de Evans e Moore foi desenvolvido na década de 50 [Moore & Evans, 1958]⁷¹. Este método é aplicável somente em cilindros com distribuições simétricas de tensões e com a remoção de camadas homogênea ao longo do perímetro da barra.

Assumindo uma amostra cilíndrica de raio R_1 com tensões rotacionais simétricas, Moore e Evans desenvolveram um método para o cálculo de tensões com remoção de camadas para qualquer raio r_1 a partir das tensões residuais medidas, a base matemática para o cálculo é [Moore & Evans, 1958]⁷¹.

$$\sigma_1(r_1) = -\left(1 - \frac{R_1^2}{r_1^2}\right) \int_{r_1}^R \left(\frac{r^2}{r^2 - R_1^2}\right) \frac{\sigma_{\theta m}^{(r)}}{r} dr \quad \text{(Equação 22)}$$

$$\sigma_2(r_1) = \sigma_{2m}(r_1) - 2 \int_{r_1}^R \left(\frac{r^2}{r^2 - R_1^2}\right) \frac{\sigma_{2m}^{(r)}}{r} dr \quad \text{(Equação 23)}$$

$$\sigma_{\theta}(r_1) = \sigma_{\theta m}(r_1) + 2 \left(\frac{r_1^2 + R_1^2}{r_1^2 - R_1^2} \right) \sigma_r(r_1) \quad (\text{Equação 24})$$

Para o caso de uma barra cilíndrica sólida o R_1 igual a zero, e a componente de tensão radial é calculada a partir da (equação 22) e as tensões longitudinais e circunferenciais são calculadas a partir das equações 23 e 24 respectivamente.

Assumindo a condição de tensões planas na superfície da barra que foi eletropolida, livre de deformações de provenientes de usinagem, os espaçamentos interatômicos dependerão das tensões residuais na superfície da barra e assim [Moore & Evans, 1958]⁷²:

$$d(\psi) = \left(\frac{1+\nu}{E} \right) \sigma_{\phi} d_0 \text{sen}^2 \psi - \left(\frac{\nu}{E} \right) (\sigma_1 + \sigma_2) d_0 + d_0 \quad (\text{Equação 25})$$

Onde " ψ " é o ângulo de inclinação normal à superfície do cilindro, " σ_1 " e " σ_2 " são as tensões principais, " E " é o módulo de Young e " ν " é o coeficiente de Poisson, " d_0 " é o espaçamento interplanar livre de tensões. Assim, a equação 25 é à base do método $\text{sen}^2 \psi$.

Na direção paralela normal a superfície $\psi = 0$, entretanto, o espaçamento interatômico observado depende apenas da soma das tensões principais. Assim o espaçamento interplanar livre de tensões é dado por:

$$d_o = \frac{d(\psi = 0)}{1 - \left(\frac{\nu}{E} \right) (\sigma_A + \sigma_C)} \quad (\text{Equação 26})$$

Onde " σ_A " e " σ_C " são as tensões residuais longitudinais e circunferenciais medidas na superfície polida. As constantes elásticas na direção (hkl) de interesse podem ser medidas diretamente [Prevéy, 1977]⁷³ e o valor de " d_0 " pode ser corrigido com uma amostra padrão.

3.1.3 Método de slitting.

Primeiramente, para a determinação de tensões residuais é necessário classificar qual tipo de tensão está sendo medido pelo método [Walton, 2002]⁷⁴. Podemos classificar as tensões residuais como macroscópicas e microscópicas do tipo I e tipo II. As tensões macroscópicas são as tensões residuais que se distribuem em larga escala e se equilibram por todo o componente. Na classificação das tensões residuais macroscópicas considera-se o material como sendo homogêneo e em uma visão macroscópica e são as tensões medidas por métodos de dissecção do material, como por exemplo, hole-drilling e métodos secção, como por

exemplo, o método utilizado neste trabalho. As tensões residuais do tipo II também chamadas de microscópicas são formadas pela não homogeneidade da estrutura cristalina do material. Estas tensões residuais estão associadas ao domínio cristalino do material, como por exemplo, o grão e também fases presentes no material e estas tensões estão relacionadas ao balanço entre diferentes grãos ou fases presentes no material. As tensões residuais microscópicas do tipo III existentes na escala atômica, correspondente à ação criada por todos os diferentes tipos de defeitos cristalinos.

O método de medição de tensões residuais a partir da remoção de material baseia-se no equilíbrio da distribuição de tensões no material e ao princípio de superposição de tensões, [Lu, 1996]⁶⁸. Baseando-se em um cilindro de aço maciço com tensões residuais trativas na superfície e compressivas no núcleo. Fazendo-se a remoção de material deste cilindro, conforme a Figura 3-6 [Metz et al, 2007]⁷⁵ ocorrerá um novo estado de tensões e a partir deste novo estado de tensões de acordo com o nível de tensões o material poderá empenar.

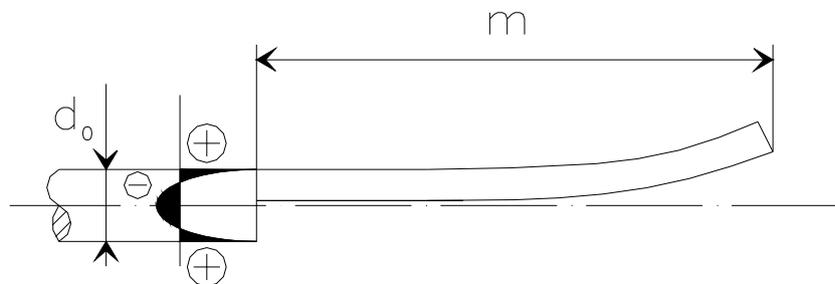


Figura 3-6 - Exemplo de uma remoção de material para caracterização de tensões residuais em uma barra cilíndrica.

As tensões residuais trativas na superfície deste cilindro estão forçando o material a ocupar uma área maior do que a que está sendo ocupada. Por outro lado, as tensões residuais compressivas no núcleo do material estão forçando este material a ocupar uma área menor do que a que está sendo ocupada no momento, porém todo este estado de tensões está em equilíbrio, e assim o material mantém a sua forma. Após a remoção de material o que ocorre é uma redistribuição de tensões residuais no material, e assim, as tensões residuais saem do equilíbrio, desta forma, há então um re-equilíbrio de tensões no material, fazendo-se que ele deforme plasticamente para aliviar as tensões sobressalentes. Neste caso em específico, a deformação ocorre de forma que o material superficial tenderá a ocupar uma área maior e assim este irá "abrir" (Figura 3-6), pois os efeitos das tensões residuais trativas na superfície sobrepõem-se ao efeito de tensões residuais compressivas do núcleo pela remoção do material. O inverso irá ocorrer em um cilindro com tensões residuais compressivas na superfície e trativas no núcleo, fazendo-se a mesma remoção de material observada na figura 1, de forma análoga ao caso anterior, o material superficial irá "fechar", pois o efeito das tensões residuais compressivas neste caso é maior [Walton, 2002]⁷⁴.

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Metodologia

A partir das características do processo e das tensões aplicadas em cada etapa, a amostragem foi feita após as etapas de endireitamento horizontal e vertical, jateamento, trefilação com ângulos de fieira de 20° e 18°, endireitamento e polimento por rolos cruzados (PTN) com ângulos de 16° e 18° para a primeira e segunda amostragem. Após a análise da primeira e segunda amostragem foram sugeridas alterações no processo em relação ao ângulo de fieira e ângulos de polimento e endireitamento por rolos cruzados (PTN), para a verificação dos parâmetros alterados foi analisada uma terceira amostragem. Nesta terceira amostragem houve variação no ângulo de fieira, que foi alterado para 15° e 16° e os ângulos de PTN utilizados foram 15°, 16° e 18°. As etapas básicas do processo são mostradas na Figura 4-1 e as setas vermelhas indicam as etapas onde foram retiradas as amostras. O diâmetro inicial da matéria-prima (fio-máquina) é de 21,25mm e o diâmetro final da barra trefilada é de 20,65mm sendo uma redução de área de aproximadamente 13%.

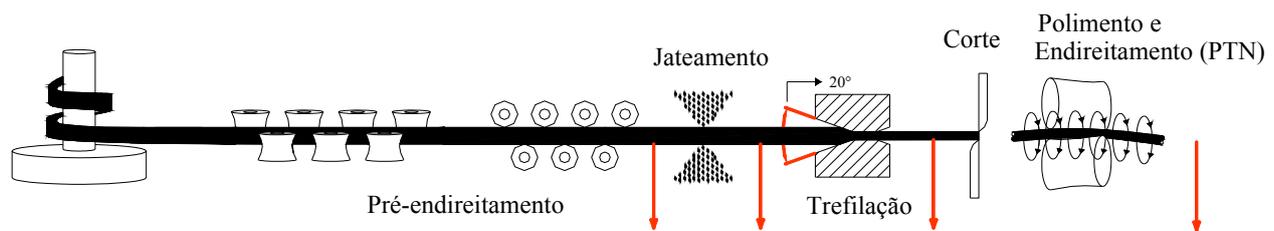


Figura 4-1-Etapas do processo de trefilação combinada.

Na primeira amostragem foram utilizadas as condições padrões de processamento do material e estes são mostrados na Tabela 4-1. Para a caracterização de tensões residuais na primeira amostragem foram utilizados os métodos de hole-drilling, difração de raios-X superficial e com remoção de camadas e o método do slitting.

A partir da análise dos dados obtidos nos ensaios de hole-drilling e difração de raios-X para a primeira amostragem, variou-se os parâmetros de pressão no pré-endireitamento vertical e do ângulo de fieira, para avaliar quais as influências destes parâmetros nas etapas subseqüentes da trefilação combinada e quais efeitos no produto final [Klein et al, 2006]⁷⁶, barras trefiladas. A Tabela 4-1 mostra as variações durante o processamento do material, a condição de processamento II foi realizada de acordo com a receita padrão de processamento do material somente variando-se o ângulo de PTN: 16° (Cond. II-A) e 18° (Cond. II-B). Para as condições de processamento III-A-B o último rolo superior de pré-endireitamento vertical foi ajustado para fornecer uma máxima pressão no fio-máquina mantendo o ângulo de fieira 20° e também variando-se o ângulo de PTN: 16° (Cond. III-A) e 18° (Cond. III-B). Na condição de processamento IV-A-B, manteve-se o último rolo de pré-endireitamento vertical com pressão máxima, trocou-se o ângulo de fieira para 18° e também foi variado o ângulo de PTN: 16° (Cond. IV-A) e 18° (Cond. IV-B). Na condição de processamento

V-A e V-B utilizaram-se os mesmos parâmetros da condição IV, porém utilizando uma pressão de pré-endireitamento vertical conforme a receita padrão.

Tabela 4-1 - Parâmetros utilizados no processamento do material.

Condição de processamento do material	Pressão No Pré-Endireitamento Vertical	Ângulo de fieira	Ângulo de PTN
Amostragem I			
Cond. I-A	Normal	20°	16°
Cond. I-B	Normal	20°	18°
Amostragem II			
Cond. II-A	Normal	20°	16°
Cond. II-B	Normal	20°	18°
Cond. III-A	Maior	20°	16°
Cond. III-B	Maior	20°	18°
Cond. IV-A	Maior	18°	16°
Cond. IV-B	Maior	18°	18°
Cond. V-A	Normal	18°	16°
Cond. V-B	Normal	18°	18°
Amostragem III			
Cond. VI-A	Normal	16°	15°
Cond. VI-B	Normal	16°	16°
Cond. VI-C	Normal	16°	18°
Cond. VII-A	Normal	15°	15°
Cond. VII-B	Normal	15°	16°
Cond. VII-C	Normal	15°	18°

A partir da compilação de todos os ensaios para a caracterização de tensões residuais via difração de raios-X e hole-drilling nas duas primeiras amostragens e levando-se em conta os perfis de tensões residuais e os

níveis de tensões residuais em cada etapa de fabricação foram observados quais fatores deveriam ser alterados para uma otimização do processo de manufatura. Foram alterados o ângulo de fiação utilizando-se ângulos de 15° e 16° e também foram utilizados ângulos distintos de polimento e endireitamento por rolos cruzados (PTN) 15°, 16°, 18°, formando assim as condições de processamento V-A, V-B, V-C, VI-A, VI-B e VI-C. Os demais parâmetros de pressão de pré-endireitamento e jateamento foram mantidos conforme a receita padrão. Os parâmetros de processamento do material para a terceira amostragem são mostrados na Tabela 4-1. A caracterização de tensões residuais para a terceira amostragem foi realizada utilizando o método de hole-drilling.

4.1.1 Retirada de amostras no processo de trefilação combinada.

As amostras foram retiradas levando-se em conta a orientação do maquinário e marcadas em quadrantes para uma análise posterior, isto se deve ao fato da possibilidade de correlacionar os dados obtidos nos ensaios com alguma heterogeneidade do processo ou da matéria-prima, conforme exemplificado na Figura 4-2, onde mostra-se a marcação da amostra no quadrante 0°. Foram retiradas amostras de 300mm após as etapas indicadas na Figura 4-1.

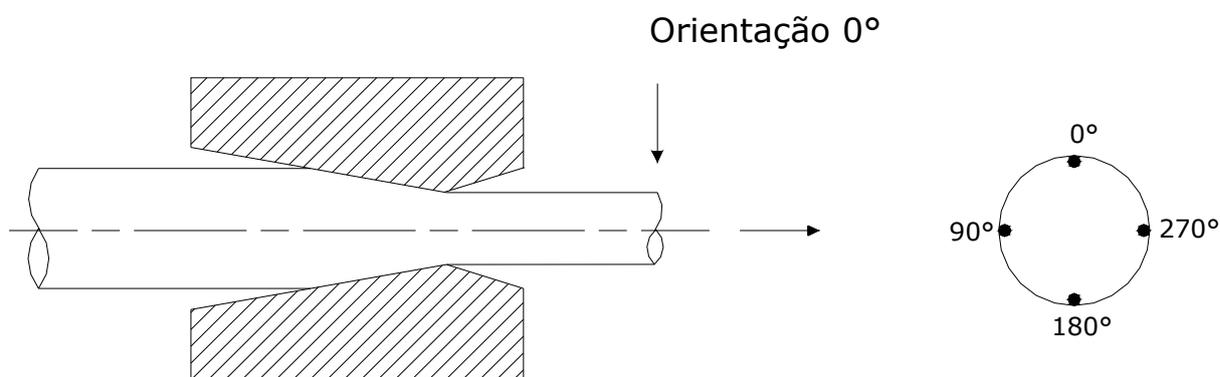


Figura 4-2 - orientação do maquinário

4.1.2 Corte de amostras.

Todas as amostras foram manuseadas cuidando-se para que não houvesse alterações nos níveis de tensões residuais induzidas no processo de trefilação combinada. Um dos cuidados tomados foi no momento de corte das amostras, onde se descartou as amostras que foram pressionadas pela morsa no momento do corte, pois essa pressão da morsa poderia alterar o nível de tensões residuais superficiais e isto seria detectado em um ensaio de difração de raios-X, por exemplo. A Figura 4-3 mostra esquematicamente como foram realizados os cortes nas amostras e também qual parte da amostra foi descartada.

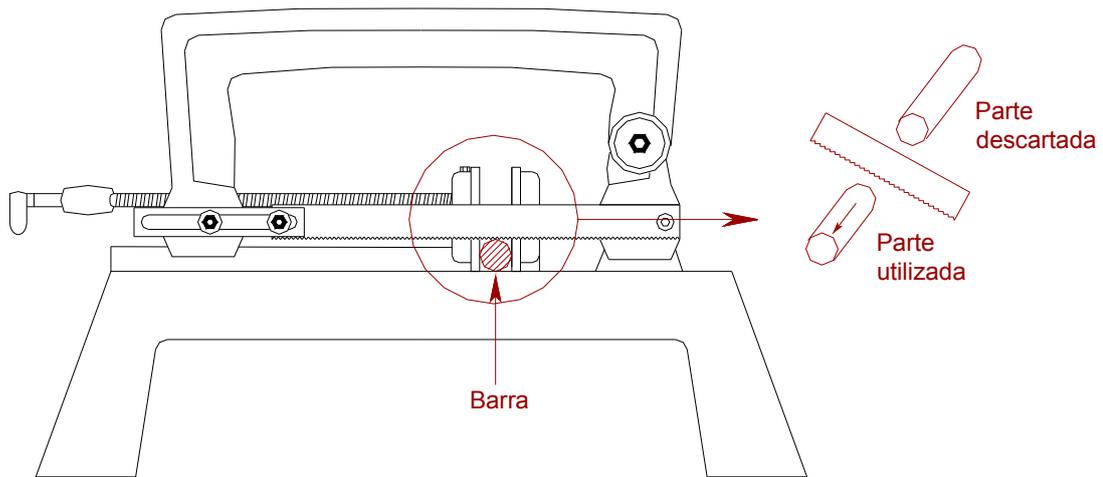


Figura 4-3 Cuidados tomados em relação à pressão exercida pela morsa nas amostras.

4.1.3 Instrumentação das barras para realização dos ensaios de hole-drilling.

A instrumentação das barras para a realização dos ensaios de medição de tensões residuais pelo método de hole-drilling compreendeu etapas de condicionamento da superfície do componente (lixamento, limpeza e adstringência), marcação do ponto de instrumentação, colagem do extensômetro e cabeamento.

As medições de tensões residuais pelo método de hole-drilling foram realizadas utilizando-se um equipamento Vishay modelo RS-200 e extensômetros da marca TML. Os parâmetros utilizados nos ensaios foram os seguintes:

- Modelo do hole-driller: Vishay RS-200
- Pressão do ar comprimido: 6 bar
- Modelo do extensômetro: TML FRS-2-11
- Dimensões dos extensômetros: 1,5mm comprimento por 1,3mm de largura, diâmetro interno 9,3mm e resistência de 120Ω.
- Modelos das fresas: 0,8mm de diâmetro (REF-34) e 1,50mm de diâmetro (REF-38), mostradas na Figura 4-4.
- Profundidade do furo: 1mm
- Incrementos do furo: 0,05mm até uma profundidade de 0,3mm após esta profundidade o incremento foi 0,1mm.

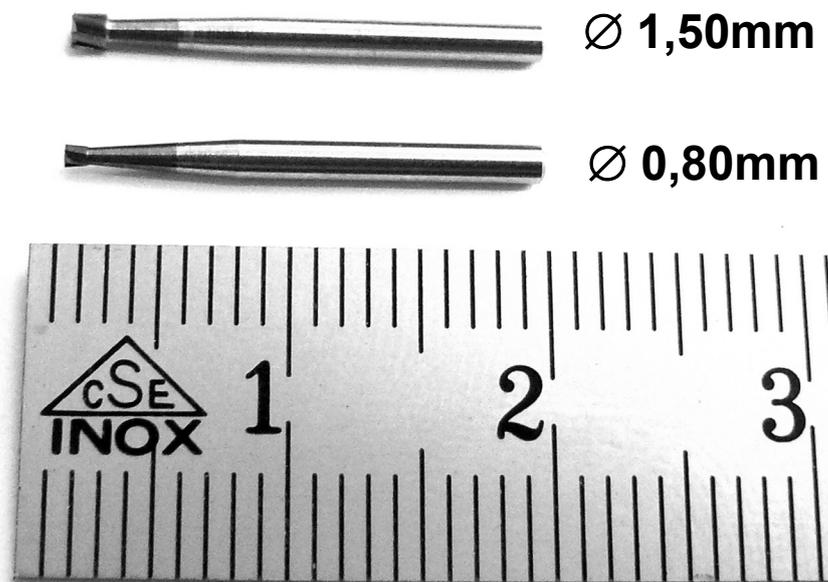


Figura 4-4 – Fresas utilizadas nos ensaios de hole-drilling, escala em centímetros.

A preparação pode ser subdividida em várias etapas distintas, os procedimentos padrões e os materiais necessários para cada etapa são descritos a seguir:

4.1.3.1 Condicionamento da superfície.

O condicionamento da superfície consiste em preparar o local escolhido para a análise para realização da colagem do extensômetro: organizar as ferramentas e material necessário para a colagem e limpeza do local. Os materiais necessários para esta tarefa são: papel macio, acetona P.A, lixas, caneta, régua, pinça, base de vidro, fita adesiva transparente, cola e cabos [Vishay, 2008]⁷⁸.

O procedimento de condicionamento da superfície foi realizado após a escolha do ponto onde será realizada a análise na barra. A preparação inicia-se lixando-se suavemente a superfície da barra intercambiando lixas de granulometria 120, 220, 320 até se chegar a 400. O lixamento ocorre sempre pela lixa de maior granulometria (120) em função da rugosidade do componente. O objetivo do lixamento é somente reduzir a rugosidade evitando-se pressões excessivas e geração de deformações. A direção de lixamento deve ser rotacionada em 90° a cada troca de lixa sendo que para a lixa de granulometria 400, última lixa utilizada, emprega-se um lixamento "aleatório". O motivo de se usar este lixamento aleatório será para que não se estabeleça uma orientação preferencial na superfície da amostra, prejudicando assim os resultados obtidos.

Após o término do lixamento da superfície, a próxima etapa é a remoção dos resíduos deixados pelo lixamento, para isto, usa-se um papel macio e seco umedecido com acetona P.A. Após a limpeza faz-se uma

inspeção visual da superfície com o objetivo de observar-se o acabamento da preparação, se o acabamento apresentar riscos profundos ou ainda abaulamento da superfície a preparação deve ser retomada.

4.1.3.2 Colagem do extensômetro.

A colagem do extensômetro inicia-se pela marcação da superfície de forma a manter um alinhamento satisfatório entre a amostra e o extensômetro. A primeira etapa foi a marcação na amostra, utilizando-se uma caneta, realiza-se a marcação das linhas para o posicionamento do strain-gage.

Após a marcação da superfície da barra para a colagem do extensômetro limpa-se a base de vidro onde o extensômetro será preparado para a colagem. A limpeza foi feita com desengordurante (acetona P.A.) usando-se um papel macio (lenço de papel).

Após este procedimento coloca-se o extensômetro sobre o vidro com uma pinça para, posteriormente, fixá-lo com fita adesiva transparente.

A próxima etapa consistiu em extrair o extensômetro da base de vidro, para isto, puxa-se uma das extremidades da fita, mantendo-o sempre tracionado. Após a extração do extensômetro do vidro, este deve ser posicionado na peça, alinhando-o com as marcações feitas.

A seguir levantou-se o extensômetro da superfície, puxando uma das extremidades da fita adesiva sem retirá-la totalmente da peça e após aplicar a cola no verso extensômetro. Um aspecto importante que foi levado em conta na aplicação da cola é a quantidade necessária para o uso, não foi aplicada a cola em excesso, pois o objetivo era formar um filme fino entre o extensômetro e a superfície do componente. Utilizou-se normalmente uma cola à base de cianoacrilato, ex: Loctite 401, 406 ou 496.

Após a colagem a fita adesiva foi tracionada com uma das mãos, pressionou-se o extensômetro contra a peça com o polegar da outra mão, mantendo uma pressão uniforme por 30s.

Após a cura da cola, a fita adesiva foi removida, puxando uma das suas extremidades paralelamente à superfície da amostra.

A próxima etapa de instrumentação consistiu na colagem dos terminais, onde se repetiu os procedimentos utilizados para a colagem do strain-gage. Após a colagem dos terminais, raspou-se os contatos com lixa ou estilete para remoção do esmalte de proteção, em seguida, colocou-se estanho sobre os contatos dos terminais e soldou-se os "leads" do extensômetro aos contatos do terminal. Esta etapa foi realizada mais rápido possível para evitar o aquecimento demasiado do extensômetro.

Após a instrumentação foram feitas algumas verificações finais:

- Teste com multímetro se não houve contato entre a peça e o terminal;
- Teste da resistência do extensômetro com multímetro;

- Solda dos cabos no terminal.

4.1.4 Passos para a realização do alinhamento do equipamento de hole-drilling e medições

Após a instrumentação das barras para a colagem dos strain-gages, realizou-se o alinhamento do equipamento de hole-drilling. O objetivo principal do alinhamento do equipamento de hole-drilling é para que o furo seja executado de forma mais paralela e centralizada em relação ao strain-gage, as principais etapas realizadas foram:

- Colou-se a barra em um dispositivo especialmente preparado para a fixação das amostras.
- Alinhou-se o equipamento de hole-drilling utilizando para isto, os dispositivos de ajuste do equipamento e também um nível de bancada.
- Após o alinhamento do equipamento em relação a amostra, realizou-se a centralização do equipamento em relação ao strain-gage. Utilizou-se para esta etapa a lupa do equipamento de hole-drilling.
- Após o alinhamento, substituiu-se a lupa do equipamento de hole-drilling por um dispositivo com uma fresa para a realização do furo.
- A realização do furo foi realizada com incrementos de 0,05mm nos primeiros 0,3mm, após alcançar esta profundidade o incremento realizado foi de 0,1mm até atingir a profundidade de 1mm. A cada incremento realizado os valores de deformações foram obtidos a partir do uso de um Spider 8 e utilizou-se o software Catman.

4.1.5 Preparação das barras para realização dos ensaios de difração de raios-X para determinação de tensões residuais.

As barras foram primeiramente cortadas com 120mm de comprimento mantendo os diâmetros iniciais de 21,25mm para o fio-máquina pré-endireitado e jateado e 20,65mm de diâmetro para as barras trefiladas e após o PTN. Foram utilizados os cuidados citados no item 5.1 deste trabalho, sendo que após o corte as amostras não sofreram nenhum tipo de condicionamento na superfície, esta é umas das vantagens da difração de raios-X para determinação das tensões residuais superficiais. A primeira etapa do ensaio é a fixação da amostra no goniômetro do equipamento de raios-X, levando-se sempre em conta a orientação da amostra e o ponto onde será feito a medição, conforme a Figura 4-2.

Após a fixação da amostra, a segunda etapa foi a determinação da altura "zero" do foco do equipamento de raios-X, conforme mostrado na Figura 4-6, assim a amostra ficou no foco do feixe de radiação. Esta etapa foi realizada com um relógio comparador, e utilizando-se os ajustes "X", "Y" e "Z" do equipamento foi

possível ajustar a distância da amostra em relação à altura "zero" do equipamento e também fazer deslocamentos laterais e verticais da amostra mostrado na Figura 4-6.



Figura 4-5 - Fixação da amostra no equipamento de raios-X.



Figura 4-6 - Ajuste da amostra na altura "zero", utilizando o ajuste "Z" do equipamento.

Após o ajuste da amostra, foi realizado o ajuste do software que comanda o equipamento de raios-X, com os seguintes parâmetros:

- Elemento do tubo de raios-X: Cr

- Comprimento de onda $k\text{-}\alpha$: 2.2897Å
- Voltagem do tubo: 35kV
- Corrente: 35mA
- Detector usado: scintillation
- Ângulos utilizados: [-45° até +45°], Ψ (ψ) = 11,
- Velocidade de escaneamento: 5s
- Incremento: 0.05.
- Tempo total de ensaio: [1 medição em 1 direção (longitudinal ou tangencial) = 2 horas]
- Pico de difração utilizado: $\{2\ 1\ 1\}$ $\{h\ k\ l\}$ 2-Ângulo teta [156.1°]
- Variação do ângulo de difração: [153°-159°]

Os equipamento utilizados foram o MP 18 e MP 19 – Stiftung Institut für Werkstofftechnik – IWT – Bremen, Alemanha.

A partir dos dados de difração obtidos calcula-se as tensões residuais utilizando o software Stress. A resposta do software para os dados obtidos a partir da difração de raios-X é um valor absoluto das tensões residuais medidas mais um desvio padrão.

As barras de erros indicadas nos gráficos de tensões residuais medidos pelo método de difração de raios-X indicam a incerteza do resultado medido pelo método $\text{sen}^2\Psi$. Este cálculo leva em conta as variações das tensões residuais em relação a cada ângulo Ψ analisado. A partir destas variações são calculadas a média e o desvio padrão da medida, indicados respectivamente no gráfico o ponto e a barra de erros.

4.1.5.1 Preparação das barras para realização dos ensaios de difração de raios-X com remoção de camadas.

Para a realização da remoção de camadas foi utilizada uma fonte específica para ataque eletrolítico, marca Struers modelo Polectrol, utilizando uma corrente de 1A e uma tensão de 5V. O tempo necessário para a remoção de camadas para profundidades que variaram de 0,05mm a 0,5mm com tempos de remoção de 20 minutos a 1 hora respectivamente. A primeira etapa de preparação da amostra é a escolha de região onde foi feita a remoção de camadas e em seguida o isolamento com fita crepe das partes onde não será feita a remoção, conforme mostrado na Figura 4-7. O método de remoção de camadas com solução ácida em uma cuba eletrolítica é um método eficiente para a remoção de pequenas profundidades, por exemplo, 0,5mm, para profundidades maiores foram utilizados usinagem convencional. Após a usinagem foi realizada a

remoção de camadas com ataque ácido, retirando assim uma pequena porção superficial de material, com objetivo de minimizar os efeitos da usinagem sobre as tensões residuais.



Figura 4-7 - Isolamento da amostra, barra trefilada diâmetro 20,65mm.

Após a preparação da região que sofreu o ataque eletrolítico, a segunda etapa é a fixação na cuba de ataque, conforme mostrado na Figura 4-8, utilizando uma solução eletrolítica de 80% de H_2SO_4 com 20% de H_3PO_4 .

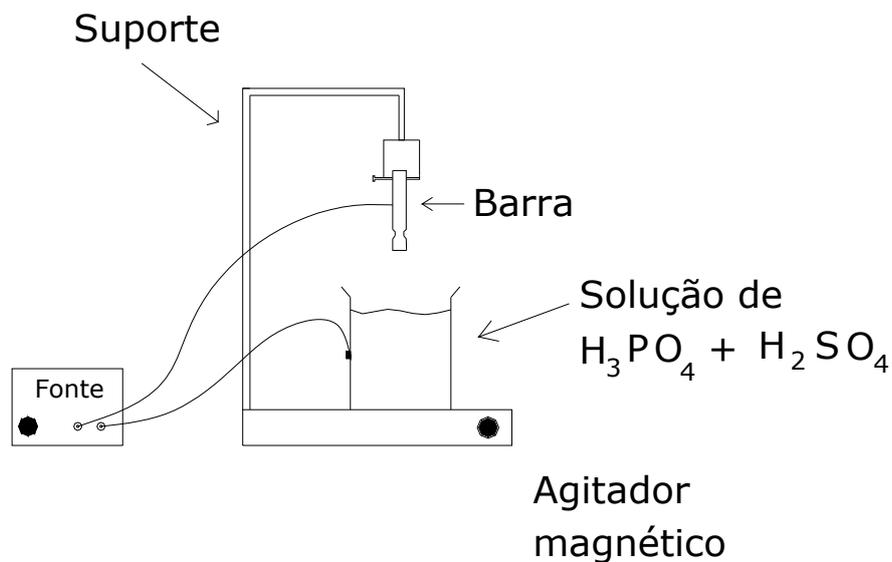


Figura 4-8 - Fixação da amostra no suporte e fixação da barra no suporte para a realização da remoção eletrolítica.

Os resultados obtidos na difração de raios-X para a determinação de tensões residuais sofreram uma correção de valores a partir do método de Moore & Evans descrito na seção 3.1.2.3 desta dissertação.

4.1.6 Método de slitting.

Na retirada de amostras do processo considerou-se a orientação das amostras retiradas em relação ao maquinário. Nos resultados obtidos verificou-se a importância da marcação no momento da retirada das amostras, pois há correlação entre os resultados obtidos nos ensaios e a posição específica do ângulo periférico da amostra em relação ao maquinário. A marcação também levou em conta o ângulo e o sentido com que a barra é processada. As amostras foram retiradas em quatro etapas da trefilação combinada

Cond. IB, sendo elas: pré-endireitamento, jateamento, trefilação e polimento e endireitamento por rolos cruzados (PTN), sendo que na etapa de PTN houve variação no ângulo dos rolos 16° e 18°. Em cada etapa foram retiradas seis amostras.

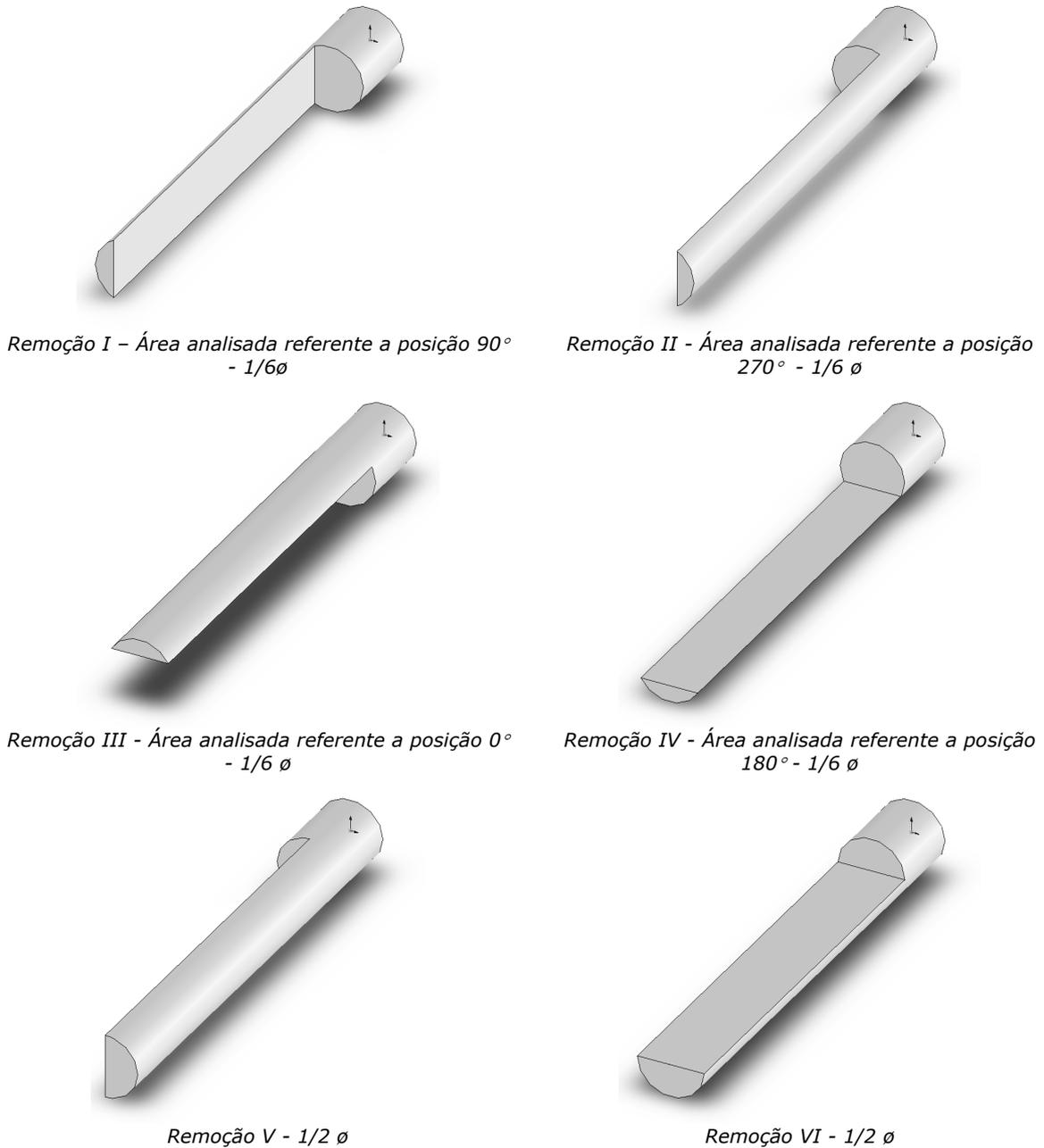


Figura 4-9 - Posição periférica das remoções realizadas.

As medições das barras foram executadas em uma máquina de medição por coordenadas Mitutoyo Beyond 710, com resolução de 0,001mm. Para a retirada de material foram realizados cortes longitudinais à uma distância 1/6 diâmetro e 1/2 diâmetro da superfície e um corte transversal a uma distância de 3,6mm e 10,82mm respectivamente do topo da amostra. Nos cortes foi utilizada uma máquina de eletroerosão a fio

Mitsubishi FX-10K usando-se um diâmetro de fio de 0,25mm. Cada corte longitudinal foi efetuado em uma posição periférica específica conforme a realização da retirada de amostras levando-se em conta a orientação do maquinário mostrado na Figura 4-2. Na Figura 4-9 são mostradas as posições periféricas das remoções realizadas, as remoções 1 a 4 foram realizados a $1/6$ do diâmetro inicial da amostras e as remoções 5 e 6 foram realizados a $1/2$ do diâmetro inicial das amostras, sempre observando a orientação original do maquinário.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise química das amostras.

As amostras foram analisadas com um espectrômetro de emissão ótica - Spectrolab LAVMB08B, e os resultados são apresentados na Tabela 5-1.

Tabela 5-1 - Composição química do aço AISI 1048.

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr
%	0.43	0.21	0.73	0.01	0.02	0.19
Elemento	Mo	Ni	Cu	Nb	Al	Fe
%	0,01	0.19	0.08	<0.01	<0.01	98.05

A composição química apresentada na tabela 5-1 demonstra que o aço analisado refere-se a qualidade AISI 1048.

5.2 Caracterização Metalográfica das amostras.

Nas figuras 5-1 a 5-5 são mostradas as microestruturas presentes na matéria-prima (fio-máquina) e na barra trefilada. Nestas micrografias pode-se observar as fases perlíticas (escura) e ferrítica (clara) características de aços médio carbono. Outro aspecto importante que se pode observar nas micrografias é o bandeamento apresentado, este bandeamento tem comportamento semelhante em todo o perímetro do fio-máquina e segue o sentido de laminação do material para o fio-máquina.

Após a trefilação o bandeamento do material segue o mesmo sentido e não há alterações da superfície em relação ao núcleo.

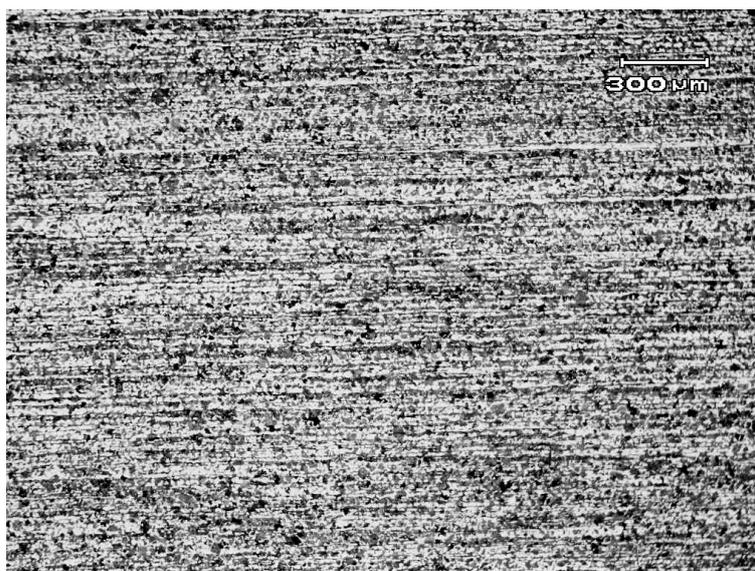


Figura 5-1 – Fio-máquina aspecto longitudinal da amostra caracterizando o sentido de laminação, estrutura perlítica (região escura) e ferrita (região clara), ataque Nital 2%, aumento 50X.

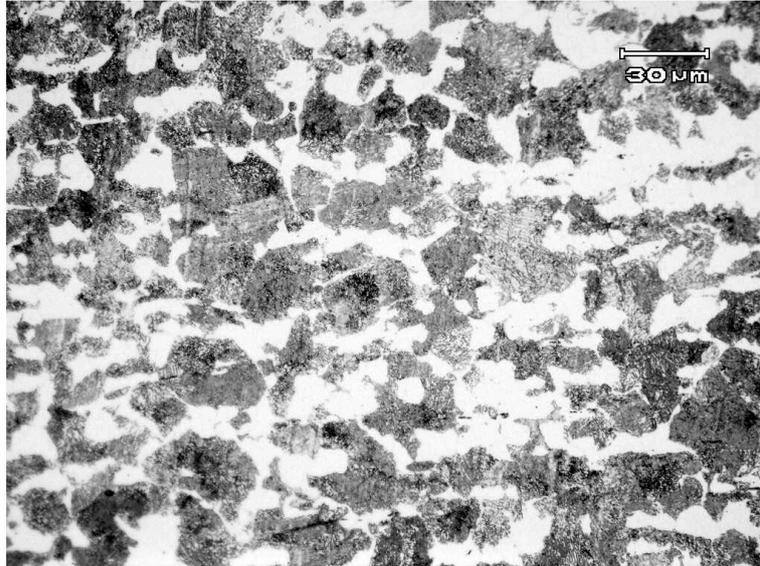


Figura 5-2 – Fio-máquina, aspecto longitudinal da amostra, estrutura perlítica (região escura) e ferrita (região clara), ataque Nital 2%.

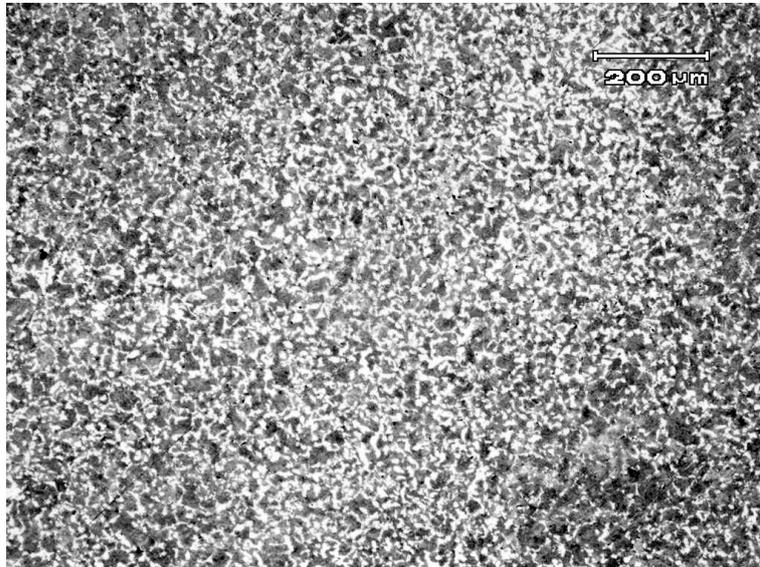


Figura 5-3 – Fio-máquina, aspecto transversal da amostra, estrutura perlítica (região escura) e ferrita (região clara), ataque Nital 2%.



Figura 5-4 - Barra trefilada, aspecto longitudinal da amostra caracterizando o sentido de trefilação, estrutura perlítica (região escura) e ferrita (região clara), ataque Nital 2%.



Figura 5-5 - Barra trefilada, aspecto longitudinal da amostra caracterizando o sentido de trefilação, estrutura perlítica (região escura) e ferrita (região clara), ataque Nital 2%.

5.3 Tensões residuais na etapa de pré-endireitamento.

5.3.1 Resultados obtidos por difração de raios-X

As tensões residuais superficiais do fio-máquina pré-endireitado medidos por difração de raios-X são mostradas na Figura 5-6, os parâmetros utilizados no processamento do material são mostrados na Tabela 5-2.

Observa-se um nível de tensões residuais compressivos. Também nota-se a presença de variações do nível de tensões residuais apresentados ao longo do perímetro da barra. Estas variações nos níveis de tensões residuais estão relacionadas à curvatura do rolo do fio-máquina, pois para a realização do pré-endireitamento do fio-máquina é necessário a aplicação de diferentes níveis de deformações plásticas ao longo da periferia devido ao formato inicial ter uma curvatura acentuada, desta forma aplicam-se deformações contrárias nos ângulos de 0° e 180° (posição superior e inferior da barra) conforme é mostrado na Figura 5-10, assim como nas posições de 90° e 270° (laterais da barra). Estes procedimentos de endireitamento promovem deformação plástica no material e as tensões residuais são geradas durante a recuperação elástica. Outro aspecto importante observado no pré-endireitamento são as tensões residuais decorrentes do contato dos rolos de endireitamento com a superfície do fio-máquina. Devido aos fatores relacionados, ocasiona-se um diferente nível de tensões residuais ao longo da periferia do fio-máquina. Também observa-se nesta figura que as tensões residuais longitudinais e tangenciais apresentam valores e comportamento similares, apresentando assim valores similares aos encontrados em outros estudos [Akikazu et al, 2001]⁹⁴. As tensões residuais mais importantes que refletirão em deformações são as tensões residuais longitudinais [Akikazu et al, 2001]⁹⁴, desta forma só foram levadas em consideração as tensões residuais longitudinais nos demais gráficos deste trabalho.

Tabela 5-2 – Parâmetros de processamento do material, Figura 5-6.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de fieira	Ângulo de PTN
Pré-Endireitamento	Cond. I-A	Normal	-	-

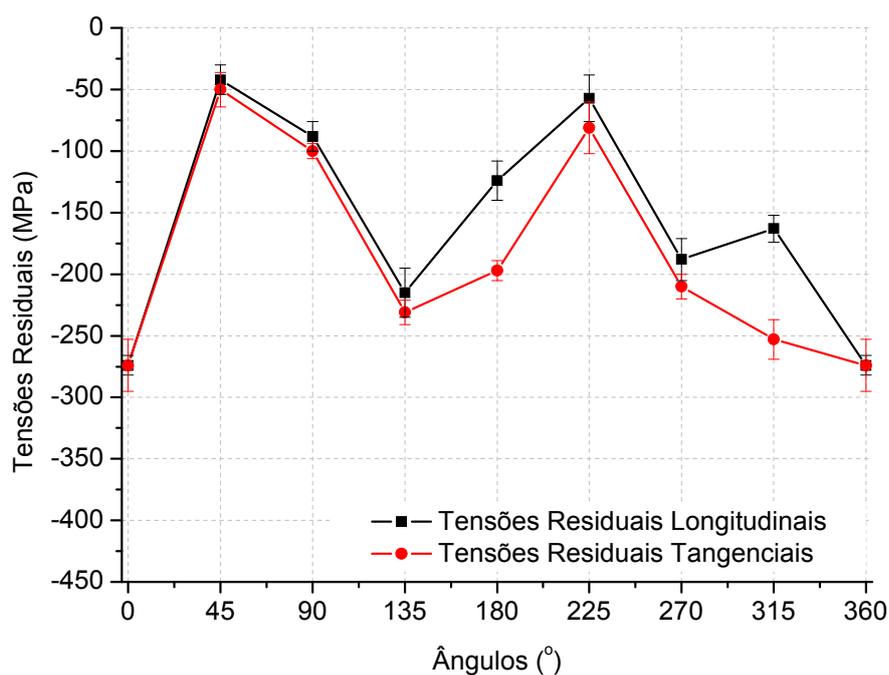


Figura 5-6 - Fio-máquina pré-endireitado, tensões residuais longitudinais e tangenciais superficiais, caracterizados por difração de raios-X, Cond. I-A.

Na Figura 5-7 são apresentadas as tensões residuais longitudinais no fio-máquina pré-endireitado caracterizado por difração de raios-X e cujos parâmetros de processamento são mostrados na Tabela 5-3. Observa-se uma comparação de tensões residuais superficiais para o fio-máquina pré-endireitado nas condições de processamento II-A e III-A (segunda amostragem). Na condição de processamento III-A no qual foi utilizada uma pressão maior no último rolo superior de pré-endireitamento vertical, nota-se que há um comportamento mais compressivo nas tensões residuais superficiais para a posição periférica de 0°. Este comportamento pode ser explicado pela maior pressão exercida no último rolo superior de pré-endireitamento que justamente induz tensões na posição periférica de 0° no fio-máquina. Na condição de processamento II-A as tensões assumem um comportamento trativo (posição 0°) e compressivos (posição 270°) e níveis de tensões próximos a zero nas posições periféricas 90° e 180°.

Tabela 5-3 – Parâmetros de processamento do material, Figura 5-7.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de fieira	Ângulo de PTN
Pré-Endireitamento	Cond. II-A	Normal	-	-
Pré-Endireitamento	Cond. III-A	Maior	-	-

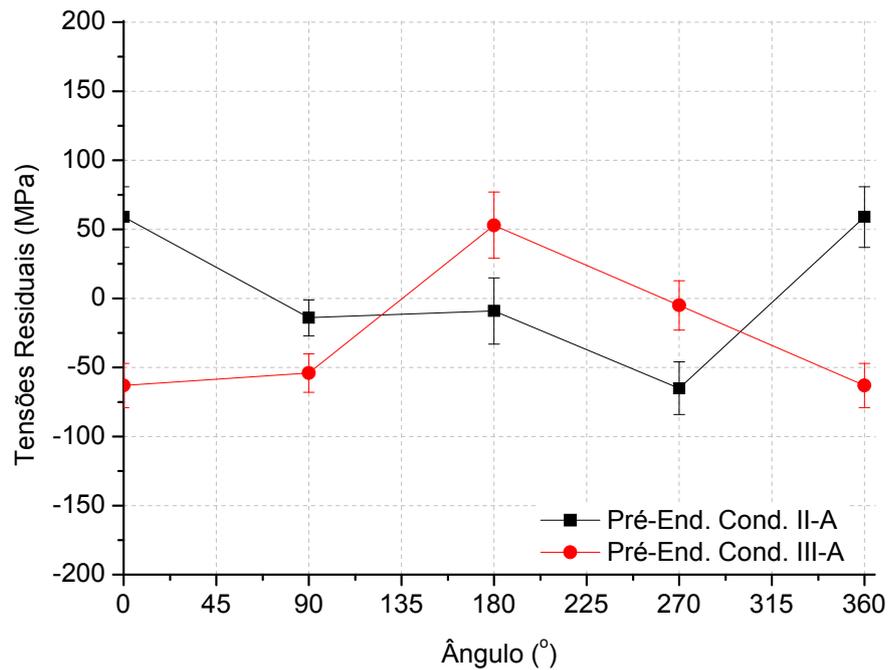


Figura 5-7 - Comparação de tensões residuais longitudinais caracterizados por difração de raios-X, fio-máquina pré-endireitado Cond. II-A e Cond. III-A.

5.3.2 Resultados obtidos por hole-drilling

Na Figura 5-8 são apresentadas as tensões residuais do fio-máquina caracterizado por hole-drilling, na Tabela 5-4 são mostrados os parâmetros de processamento do material. Nesta figura observa-se o perfil de tensões residuais obtidos pelo método de hole-drilling ao longo da periferia do fio-máquina, nota-se que há variações significativas ao longo do perímetro do fio-máquina, conforme mostrado nos ensaios de difração de raios-X e estas variações são mantidas para profundidade maiores, já que o valor medido por hole-drilling corresponde a uma profundidade maior que o medido por difração de raios-X. Os resultados apresentados nos ensaios de raios-x para o fio-máquina pré-endireitado seguem a mesma tendência, apresentando variações ao longo da posição periférica. Esta variação pode ser comparada observando-se os resultados apresentados nos ensaios de hole-drilling, Figura 5-6.

Tabela 5-4 – Parâmetros de processamento do material, Figura 5-8.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de fieira	Ângulo de PTN
Pré-Endireitamento	Cond. I-A	Normal	-	-

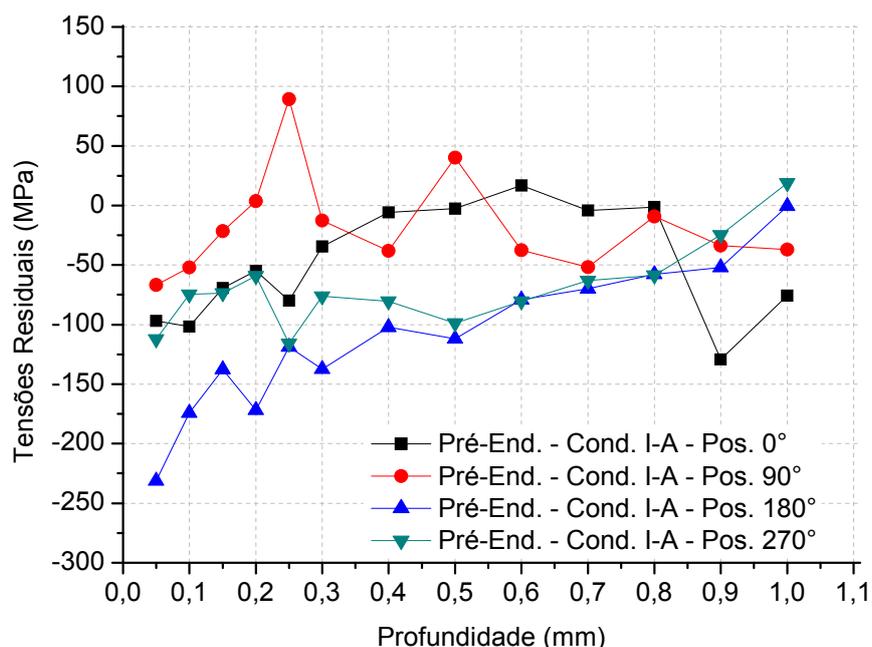


Figura 5-8 - Perfis de tensões residuais longitudinais caracterizados por hole-drilling, fio-máquina após o pré-endireitamento, Cond. I-A.

5.3.3 Resultados obtidos pelo método do slitting

Na Figura 5-11 são apresentadas as deflexões do fio-máquina caracterizado pelo método de slitting e na Tabela 5-5 são mostrados os parâmetros de processamento do material. Na Figura 5-11 observam-se as deflexões medidas pelo método do slitting para o fio-máquina pré-endireitado Cond. II-A, nota-se que há variações no nível e comportamento das tensões residuais apresentadas na região periférica do fio-máquina, este mesmo comportamento também foi observado nos ensaios de hole-drilling e difração de raios-X.

O desenvolvimento de um sistema de tensões internas como resultado de deformações plásticas não homogêneas pode ser demonstrado com o exemplo de um endireitamento plástico de uma barra. A Figura 5-11(a) [Wang, 2002]¹⁰¹ representa a curvatura de uma barra, assume-se que esta barra é composta de várias finas camadas ao longo do raio desta barra. A tensão máxima trativa está na superfície superior desta barra e decai para um valor zero na posição referente a linha neutra, por outro lado esta tensão torna-se compressiva após a linha neutra atinge valores compressivos máximos na posição superficial oposta da barra. Se a tensão não excede o limite de elasticidade do material em nenhum ponto, a remoção da tensão e momentos aplicados no material permitirá que o material volte ao estado original. Se, entretanto, a tensão

máxima aplicada ao material exceder o escoamento, as camadas irão estender ou comprimir. Esta quantia é maior na superfície e decai a zero na linha neutra do material.

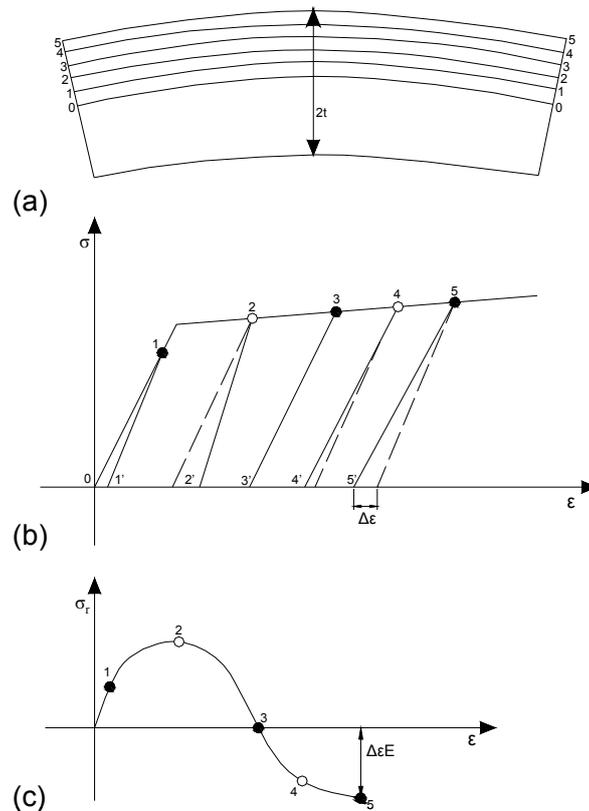


Figura 5-9 – Geração de tensões residuais durante o endireitamento de um cilindro.

No momento em que a tensão de endireitamento está sendo aplicada, a distribuição de tensões ao longo da largura da barra é representada na Figura 5-11(b), com as camadas 2 a 5 no regime plástico e a camada 1 no regime elástico da curva tensão deformação. Se o momento aplicado para o endireitamento é liberado a barra voltará para o seu estado original, mas não completamente, pois isto iria requerer uma completa reversão das tensões plásticas e elásticas aplicadas. De fato, o retorno elástico será diferente ao longo do raio da barra devido as diferenças de deformações plásticas impostas ao longo do raio da barra. Supondo que a camada 5 é isolada da camada 4, o descarregamento do ponto 5 na verdade fará com que este descarregamento só seja efetivo a partir da deformação plástica da camada 4, ou ainda, a camada 4 resistirá a deformação plástica da camada 5. Como resultado a camada 5 estará em compressão, as tensões de compressão na camada 5 serão $\Delta\epsilon E$, onde $\Delta\epsilon$ é a deformação residual mostrada na Figura 5-11(b) e o E é o modulo de Young do material. Para a camada 4 a situação é um pouco mais complicada, como a camada 3 irá resistir a extensão da camada 4, mas a camada 5 promove a extensão. A combinação resultante irá produzir uma tensão residual compressiva. É previsível afirmar que em algum ponto do material estes dois fatores encontrarão um equilíbrio resultando em tensões residuais nulas, como mostrado na camada 3. Para as camadas abaixo (2-1) o processo inicia-se novamente sendo análogo.

A distribuição de tensões residuais é apresentada na Figura 5-11(c). Dois pontos importantes podem ser notados na Figura 5-11(c): primeiro, há um equilíbrio das tensões trativas e compressivas; e segundo, a superfície que originalmente foi plasticamente deformada apresenta tensões residuais compressivas, pelo

efeito da camada inferior estar tracionando a superfície do material. Além dos momentos aplicados pelos rolos no endireitamento ainda há o efeito superficial de contato entre o rolo e o fio-máquina, e esta pequena deformação superficial também irá induzir tensões no material [Wang, 2002]¹⁰¹.

Após a remoção de material deixando 1/6 do diâmetro inicial da barra, remoções de material 1 (90°) e 2 (270°) as tensões tem caráter trativo e compressivo respectivamente. O comportamento oposto de tensões residuais (trativo e compressivo) apresentados em posições periféricas opostas (90°-270°) do fio-máquina está relacionado aos momentos aplicados que geram deformação no material (elásticas e plásticas) para efetuar o endireitamento, conforme mostrado na Figura 5-10.

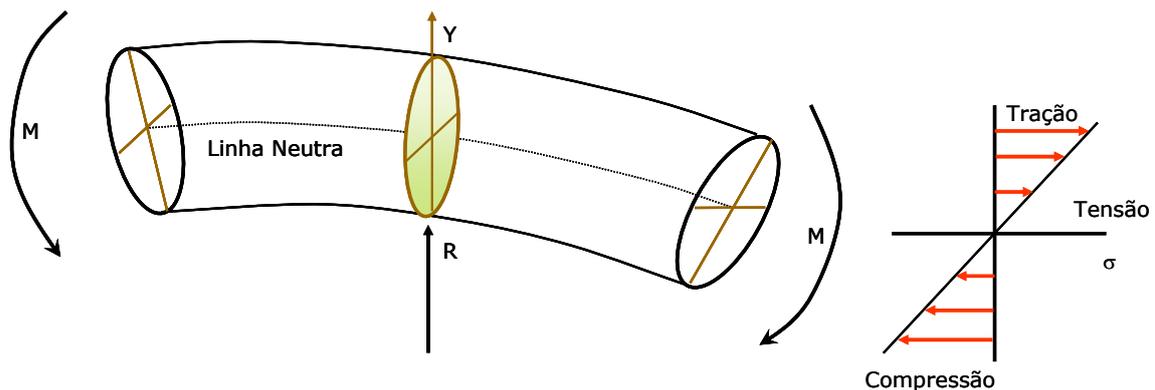


Figura 5-10 – Carregamentos durante o pré-endireitamento.

Quando estes momentos são retirados, as deformações elásticas são retornadas, deixando deformações permanentes não homogêneas, preponderantemente trativas na região superior e compressivas na inferior. Como resultado do gradiente de deformações plásticas, deformações elásticas são induzidas gerando as tensões residuais observadas. As posições periféricas 90° e 270°. As remoções 5 e 6 ($\frac{1}{2} \varnothing$) apresentam um comportamento trativo. Este comportamento observado nos ensaios de slitting é similar ao comportamento observado nas outras técnicas de medição.

Tabela 5-5 – Parâmetros de processamento do material, Figura 5-11.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de fieira	Ângulo de PTN
Pré-Endireitamento	Cond. II-A	Normal	-	-

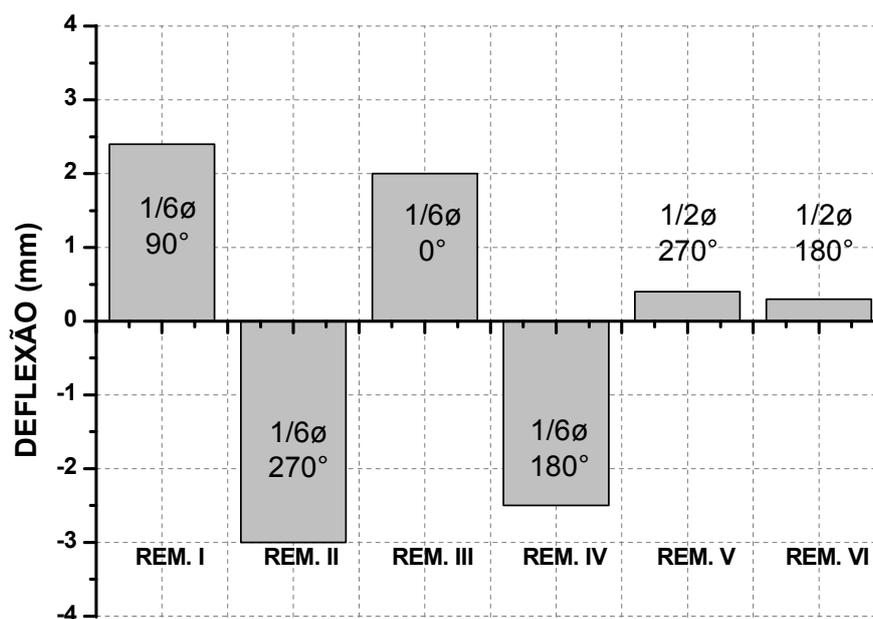


Figura 5-11 - Deflexões apresentadas pelo fio-máquina pré-endireitado, Cond. II-A.

5.4 Tensões residuais na etapa de jateamento.

5.4.1 Resultados obtidos por difração de raios-X

São apresentadas na Figura 5-12 as tensões residuais do fio-máquina jateado caracterizado pelo método de difração de raios-X, na Tabela 5-6 são mostrados os parâmetros de processamento do material. Nesta figura, são mostrados os níveis de tensões residuais após o jateamento para a condição de processamento I-A. Observa-se um nível de tensões residuais compressivos ao longo da periferia do fio-máquina com pequenas variações ao longo da posição periférica, estas pequenas diferenças estão associadas a variações durante o jateamento e também a alterações induzidas anteriormente na etapa de pré-endireitamento.

Tabela 5-6 – Parâmetros de processamento do material, Figura 5-12.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de fieira	Ângulo de PTN
Jateamento	Cond. I-A	Normal	-	-

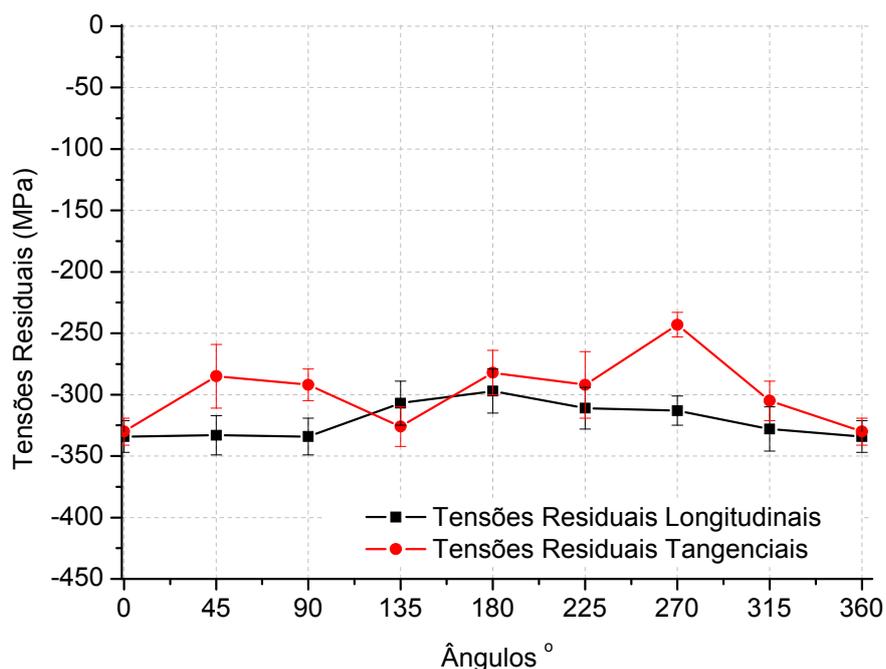


Figura 5-12 - Fio-máquina Jateado, tensões residuais longitudinais e tangenciais superficiais, Cond. I-A.

A caracterização das tensões residuais longitudinais do fio-máquina jateado pelo método de difração de raios-X são apresentadas na Figura 5-13, na Tabela 5-7 são mostrados os parâmetros de processamento. Nesta figura é mostrada uma comparação do nível de tensões residuais para o fio-máquina jateado entre as condições de processamento II-A e III-A obtidos via difração de raios-X. Observa-se que há uma influência da pressão de pré-endireitamento no nível de tensões residuais, as tensões apresentam um comportamento compressivo para ambas as condições de processamento do material, porém utilizando-se uma pressão maior no pré-endireitamento vertical as tensões residuais nas posições periféricas 90°, 180° e 270° tendem a ser menos compressivas. Comparando-se os níveis de tensões residuais apresentados na condição de processamento I-A (amostragem I) (Figura 5-12) e II-A (amostragem II) (Figura 5-13), observa-se que as tensões residuais apresentam valores próximos (-300MPa / -350MPa) ao longo da periferia do fio-máquina e que este comportamento muda utilizando uma maior pressão de pré-endireitamento o que demonstra a influência das tensões induzidas em etapas posteriores do processo em etapas subsequentes.

Tabela 5-7 – Parâmetros de processamento do material, Figura 5-13.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de fieira	Ângulo de PTN
Jateamento	Cond. II-A	Normal	-	-
Jateamento	Cond. III-A	Maior	-	-

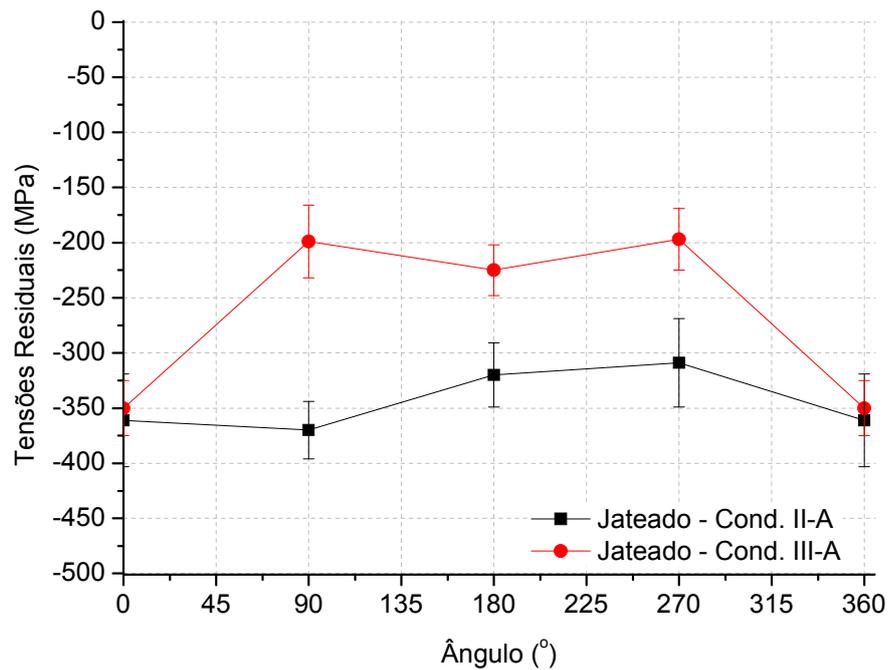


Figura 5-13 - Comparação de tensões residuais longitudinais superficiais para o fio-máquina jateado, Cond. II-A e Cond. III-A.

5.4.2 Resultados obtidos por hole-drilling

Na Figura 5-14 são apresentadas as tensões residuais do fio-máquina jateado caracterizado pelo método de hole-drilling, na Tabela 5-8 são mostrados os parâmetros de processamento. Nesta figura observa-se o perfil de tensões residuais medido pelo método de hole-drilling para o fio-máquina jateado utilizando a condição de processamento I-A. As tensões residuais apresentam um comportamento compressivo tendendo a trativos com o aumento da profundidade. Nota-se que não houve variações significativas em relação à posição periférica utilizando a condição padrão de processamento do material.

Tabela 5-8 – Parâmetros de processamento do material, Figura 5-14.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de fieira	Ângulo de PTN
Jateamento	Cond. I-A	Normal	-	-

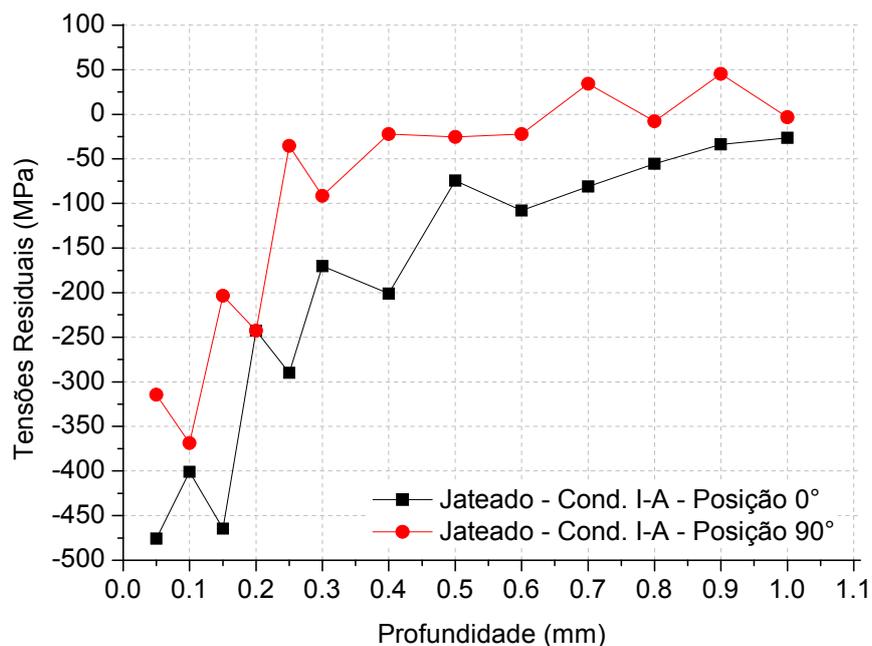


Figura 5-14 - Fio-máquina Jateado, comparação do perfil de tensões residuais longitudinais obtidas pelo método de hole-drilling para duas posições periféricas, Cond. I-A.

As tensões residuais do fio-máquina jateado caracterizado pelo método de hole-drilling e difração de raios-X são apresentadas na Figura 5-15, na Tabela 5-10 são mostrados os parâmetros de processamento do material.

Na Figura 5-15, observa-se uma boa concordância entre os valores obtidos pelos métodos de hole-drilling e difração de raios-x. As variações do nível de tensões residuais superficiais em relação a posição periférica do fio-máquina apresentados no pré-endireitamento são diminuídos no jateamento, mas não eliminadas.

Tabela 5-9 – Parâmetros de processamento do material, Figura 5-15.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de fieira	Ângulo de PTN
Jateamento	Cond. I-A	Normal	-	-

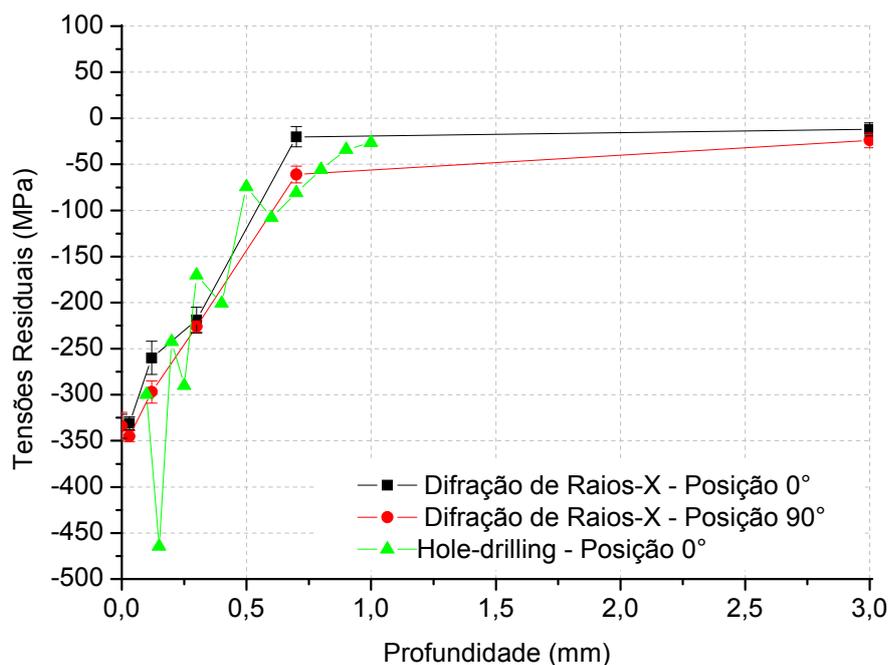


Figura 5-15 - Fio-máquina jateado, comparação de perfil de tensões residuais medidos pelo método de difração de raios-X e hole-drilling, Cond. I-A.

5.4.3 Resultados obtidos pelo método do slitting

Os parâmetros mostrados na Tabela 5-10 são referentes aos parâmetros de processamento do fio-máquina jateado caracterizado pelo método de slitting cujas deflexões são mostradas na Figura 5-16. Nesta figura são apresentadas as deflexões medidas no ensaio de slitting para o fio-máquina jateado. Após o jateamento as tensões residuais apresentam um comportamento compressivo em toda superfície, remoções 1 a 4 (1/6 do diâmetro inicial), apresentando pequenas diferenças no nível de tensões ao longo da periferia do fio-máquina. Este comportamento também foi demonstrado nos trabalhos de [Kennedy et al, 2004]⁷⁹. Estas pequenas diferenças podem ser explicadas por pequenas variações do equipamento durante o processamento do material ou o efeito do pré-endireitamento mantido no fio-máquina. Também observa-se a $\frac{1}{2} \varnothing$ o comportamento trativo ou compressivo apresentado, este comportamento pode ser explicado pela influência do pré-endireitamento (etapa anterior).

Tabela 5-10 – Parâmetros de processamento do material, Figura 5-16.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de fieira	Ângulo de PTN
Jateamento	Cond. II-A	Normal	-	-

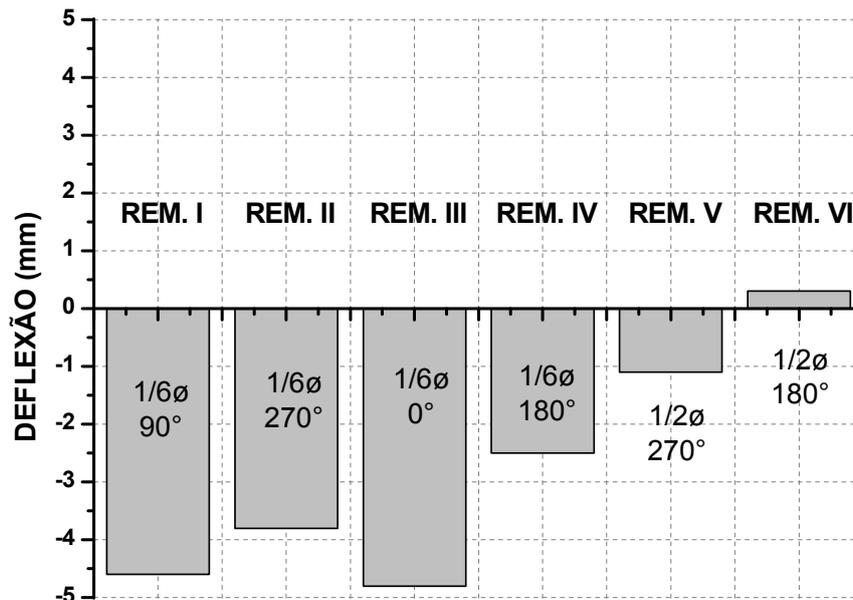


Figura 5-16 - Deflexões apresentadas pelo fio-máquina jateado, Cond. II-A.

5.5 Tensões residuais na etapa de Trefilação.

5.5.1 Resultados obtidos por difração de raios-X

Na Tabela 5-11 são mostrados os parâmetros de processamento do fio-máquina jateado caracterizado pelo método de difração de raios-X aos quais são apresentadas as tensões residuais na Figura 5-17. Nesta figura são apresentadas as tensões residuais longitudinais e tangenciais após a etapa de trefilação ao longo do perímetro da barra trefilada, Cond. I-A. Neste gráfico é possível observar a permanência das diferenças de tensões residuais após a trefilação ocasionadas pela etapa de pré-endireitamento, mesmo o jateamento por granalhas tendo eliminado este efeito na superfície do fio-máquina, este comportamento volta a se manifestar após a trefilação. Este efeito não pode ser facilmente explicado, devido as deformações superficiais impostas durante o jateamento e também as deformações durante a trefilação. Este efeito de "memória" que o material apresentou deve ser estudado mais profundamente para se encontrar uma

explicação científica para este efeito. Também observa-se um alto nível de tensões residuais trativas na superfície da barra, com uma grande variação ao longo do perímetro da barra. Estas variações das tensões residuais estão relacionadas ao pré-endireitamento que induz deformações não homogêneas ao longo do perímetro da barra.

Tabela 5-11 – Parâmetros de processamento do material, Figura 5-17.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de fieira	Ângulo de PTN
Trefilação	Cond. I-A	Normal	20°	-

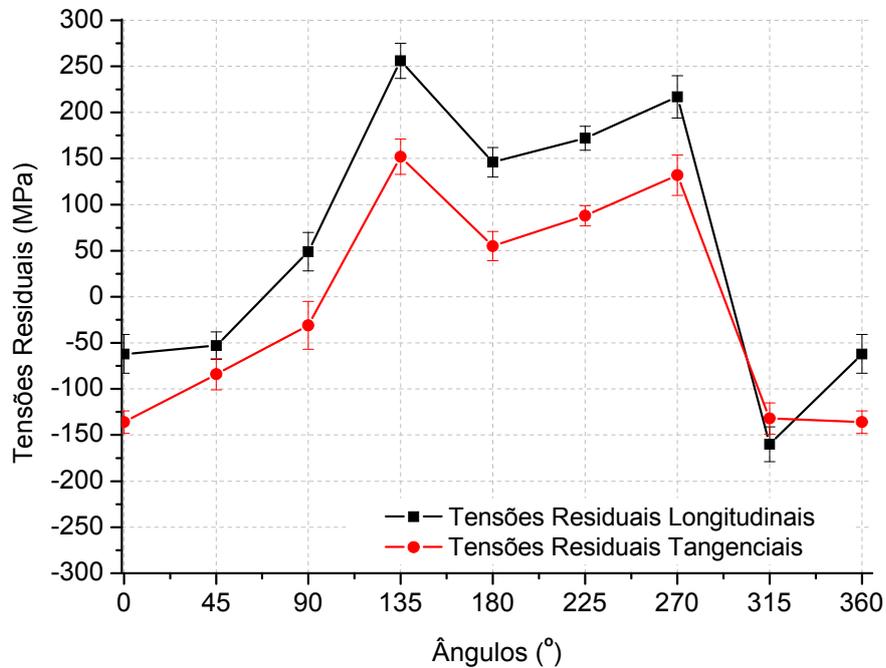


Figura 5-17 - Barra trefilada, tensões residuais longitudinais superficiais, Cond. I-A.

Na Tabela 5-11 são mostrados os parâmetros de processamento do fio-máquina jateado caracterizado pelo método de difração de raios-X aos quais são apresentadas as tensões residuais na Figura 5-18. Observa-se o perfil de tensões residuais caracterizado via difração de raios-X para a barra trefilada, onde nota-se o comportamento trativo na superfície da barra, chegando a tensões trativas de aproximadamente 250MPa para profundidades de 1,0mm após esta profundidade as tensões tendem a ser menos trativas. Na profundidade de 3,3mm as tensões são compressivas com valor médio de -100MPa seguindo este comportamento até 5,6mm onde são observadas tensões residuais compressivas de -150MPa.

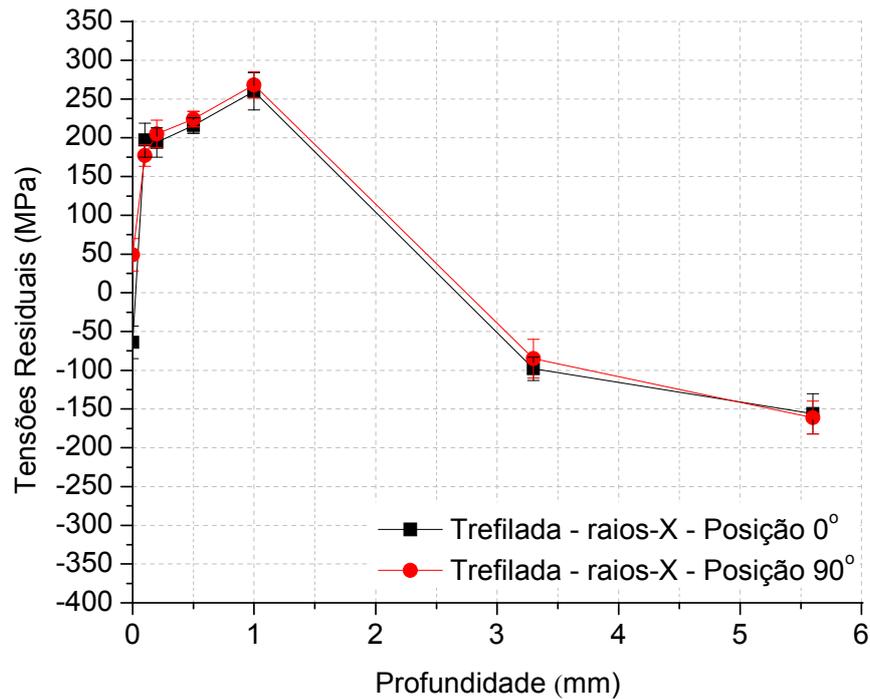


Figura 5-18 - Perfil de tensões residuais longitudinais para a barra trefilada com ângulo de feira 20° - Cond. I-A, medição por difração de raios-X.

5.5.2 Resultados obtidos por hole-drilling

Nos primeiros ensaios realizados não houve concordância entre o método de hole-drilling com os resultados observados na técnica de difração de raios-X, obtendo-se valores muito discrepantes conforme mostrado na Figura 5-19.

As tensões residuais longitudinais na barra trefilada medidas pelo método de hole-drilling e difração de raios-X são apresentadas na Figura 5-19, e os parâmetros utilizados no processamento do material são apresentados na Tabela 5-12. As tensões residuais medidas pelo método de hole-drilling ultrapassaram o limite de escoamento do material que é próximo de 650MPa. Estas discrepâncias de resultados também já foram observadas por outros pesquisadores [Hampton & Nelson, 1989]⁸⁰, [Yoshihisa et al 1992]⁸¹. Uma explicação para estas diferenças é que ao se fazer o furo para medição do nível de tensões residuais cria-se um novo estado de tensões no material fazendo-se com que a superfície próxima ao furo escoe plasticamente, ocasionando uma deformação plástica superficial na periferia do furo, e assim o método neste caso não apresenta resultados satisfatórios. Porém de acordo com a teoria formulada por Hampton & Nelson [Hampton & Nelson, 1989]⁸² explicando os motivos desta incoerência de resultados, para resolver este problema foi proposto a utilização de uma fresa com diâmetro menor ao utilizado, eliminando desta forma a deformação plástica superficial causada pelas tensões aliviadas pelo furo. Desta forma observou-se valores satisfatórios de tensões residuais nas barras trefiladas, conforme mostrado na Figura 5-21 e Figura 5-20 mostrando a coerência desta medida em relação a técnica de difração de raios-X.

Tabela 5-12 – Parâmetros de processamento do material, Figura 5-19.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de fieira	Ângulo de PTN
Trefilação	Cond. I-A	Normal	20°	-

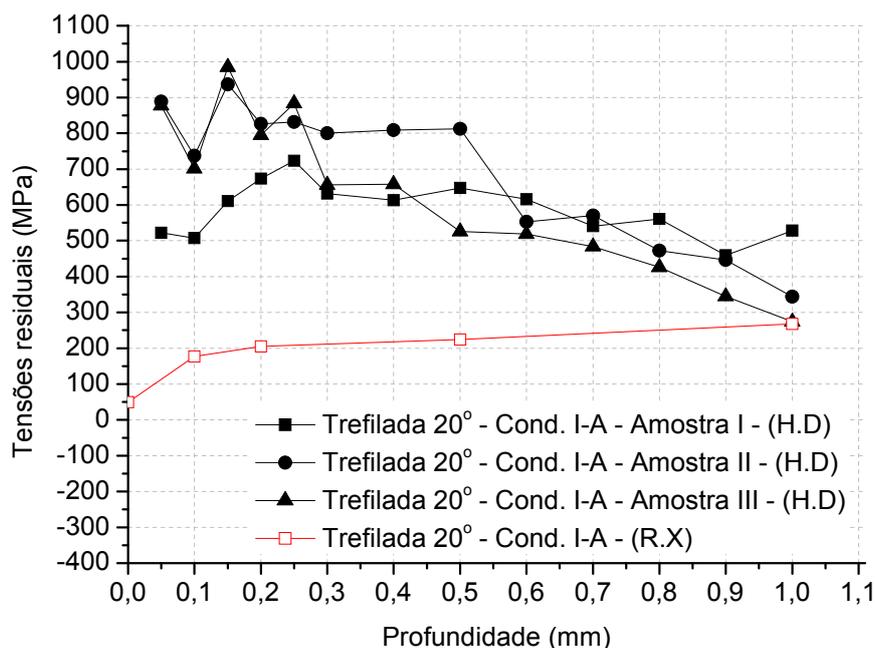


Figura 5-19 - Perfis de tensões residuais longitudinais medidos pelo método de hole-drilling e difração de raios-X na barra trefilada com ângulo de fieira de 20°, Cond. I-A, valores discrepantes.

Na Figura 5-20 observa-se uma comparação do perfil de tensões residuais longitudinais obtidos via difração de raios-X com remoção de camadas e o método de hole-drilling realizado com uma fresa de menor diâmetro, sendo o diâmetro do furo 1,10mm para a fresa de menor diâmetro 0,80mm (REF. 34) e 1,80mm para a fresa convencional 1,50mm (REF.38). Os parâmetros do processo são mostrados na Tabela 5-13. A partir dos resultados obtidos e a comparação dos ensaios com o método de difração de raios-X observou-se resultados satisfatórios e confiáveis. A única desvantagem de se usar uma fresa de diâmetro menor é a profundidade de validade dos resultados obtidos no ensaio ser menor 0,7mm [Grant et al, 2002]⁸³ e [Vishay, 1999]⁸⁴ comparando-se com o diâmetro padrão que é de 1mm.

Tabela 5-13 – Parâmetros de processamento do material, Figura 5-20.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de fieira	Ângulo de PTN
Trefilação	Cond. V-A	Normal	18°	-

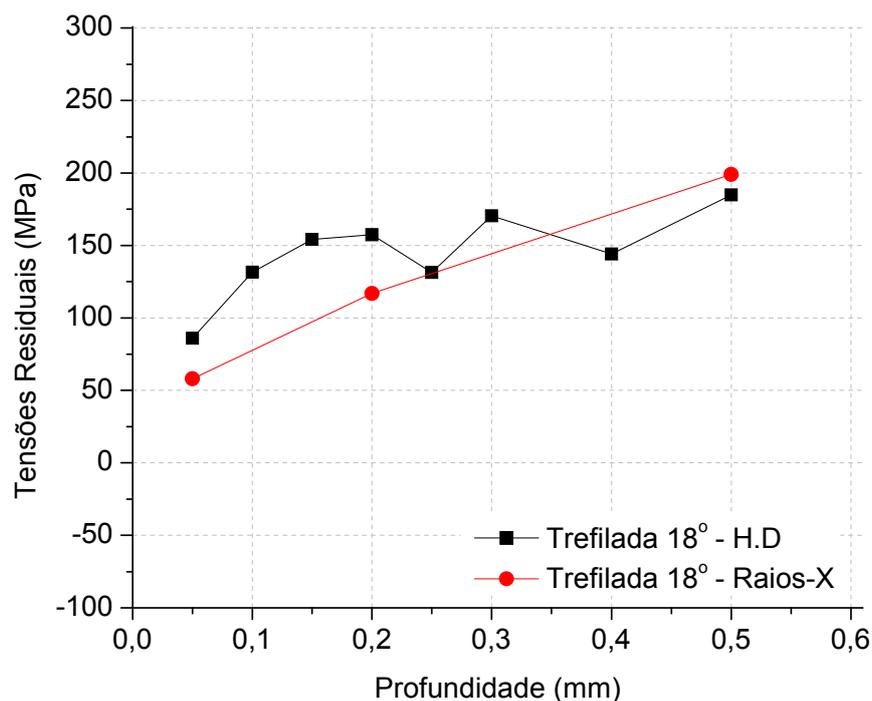


Figura 5-20- Comparação de perfis de tensões residuais longitudinais para a barra trefilada, utilizando o método de hole-drilling e difração de raios-X com remoção de camadas, ângulo de fieira de 18°, Cond. V-A.

A Figura 5-21 mostra uma comparação do perfil de tensões residuais para a barra trefilada obtidos via difração de raios-X e hole-drilling, em amostras com a mesma condição de processamento, indicada na Tabela 5-14. Para sanar os problemas ocorridos na medição por hole-drilling nas amostras trefiladas da amostragem I, utilizou-se a fresa de diâmetro menor 0,80mm (REF. 34) em relação ao diâmetro convencional 1,50mm (REF. 38). Os resultados apresentados nestes ensaios estão coerentes com os encontrados na difração de raios-X, o que demonstra mais uma vez a validade do uso de uma fresa de diâmetro menor. As tensões residuais apresentam um comportamento trativo com valores próximos de 200MPa para pequenas profundidades e tendem a valores maiores com o aumento de profundidade até 0,7mm, para profundidades maiores as tensões residuais foram medidas via difração de raios-X e os resultados são apresentados na Figura 5-18.

Tabela 5-14 – Parâmetros de processamento do material, Figura 5-21.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de fieira	Ângulo de PTN
Trefilação	Cond. II-A	Normal	20°	-

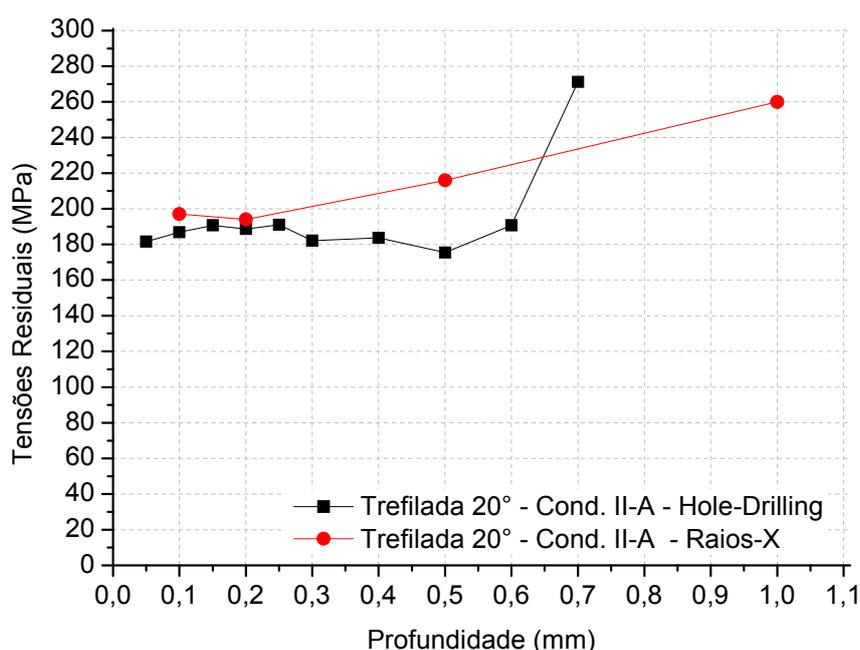


Figura 5-21 - Comparação de tensões residuais longitudinais para as técnicas de hole-drilling e difração de raios-X, ângulo de fieira 20°, Cond. II-A.

Na Figura 5-22 observa-se que os resultados obtidos com técnicas de difração de raios-X e hole-drilling utilizando e as condições de processamento do material são indicadas na Tabela 5-15. Uma fresa de menor diâmetro estão coerentes apresentando boa aproximação entre os dois métodos. As tensões residuais apresentam comportamento trativo na superfície e tendem a valores mais trativos com o aumento da profundidade até 1,0 mm.

Tabela 5-15 – Parâmetros de processamento do material, Figura 5-22.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de fieira	Ângulo de PTN
Trefilação	Cond. I-A	Normal	20°	-

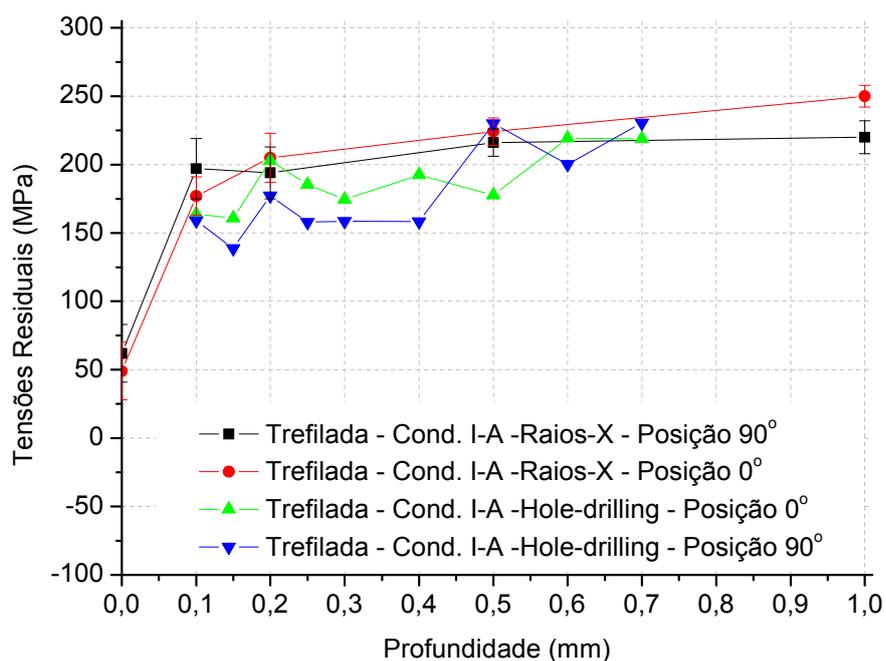


Figura 5-22 - Barra trefilada com ângulo de fieira de 20°, comparação de perfis de tensões residuais longitudinais obtidos por difração de raios-X e hole-drilling.

5.5.3 Influência do ângulo de fieira

Na Figura 5-23, observa-se a comparação do perfil de tensões residuais longitudinais para dois ângulos distintos de fieira, 15° e 20°, os parâmetros utilizados no processamento do material são mostrados na Tabela 5-16. Nesta comparação o ângulo de fieira de 15° induz tensões menos trativas em profundidades até 0,5mm após esta profundidade os dois ângulos tem uma tendência a induzirem tensões residuais com um mesmo nível até uma profundidade de 0,7mm. Correlacionando os resultados obtidos com o fator Δ , utilizando um ângulo de ferramenta menor (15°, $\Delta = 4$) a zona de deformação plástica avança para o núcleo do fio-máquina, assim há uma maior deformação no núcleo do material se comparado com um ângulo de ferramenta maior (20°, $\Delta = 5,5$), desta forma, teremos regiões próximas a superfície com tensões residuais trativas com níveis menores utilizando-se o ângulo de 15° comparando-se as tensões residuais próximas a superfície para o ângulo de 20° [Elices, 2004]⁴⁵.

Tabela 5-16 – Parâmetros de processamento do material, Figura 5-23.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de fieira	Ângulo de PTN
Trefilação	Cond. I-A	Normal	20°	-
Trefilação	Cond. VII-A	Normal	15°	-

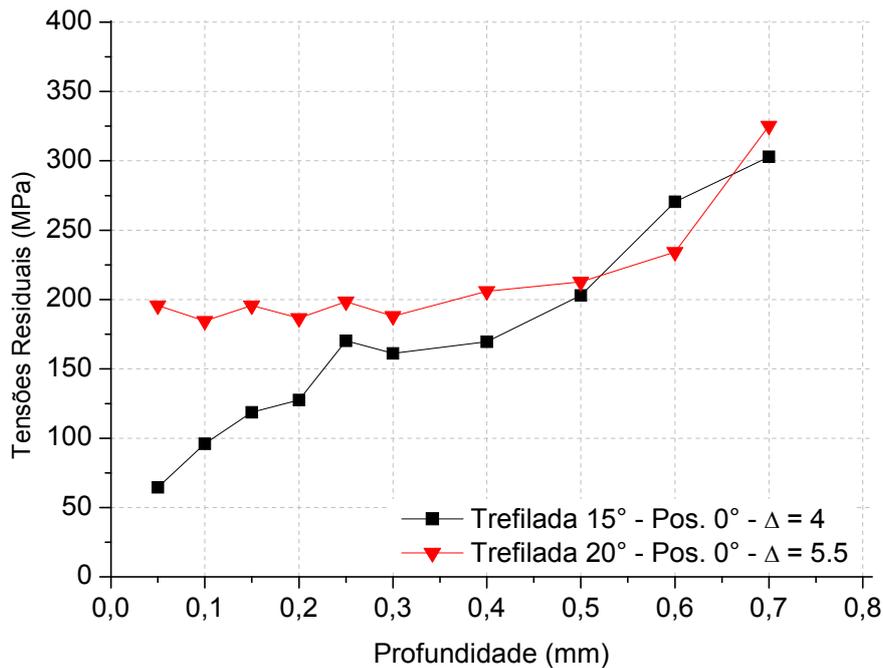


Figura 5-23 - Comparação de perfis de tensões residuais longitudinais obtidos via hole-drilling para a barra trefilada com ângulos de fieira de 15° (Cond. VII-A) e 20° (Cond. II-A).

A Figura 5-24 mostra o perfil de tensões residuais como uma função da profundidade para as amostras trefiladas com dois semi-ângulos de fieira diferentes obtidos via difração de raios-X, 20° e 18°, respectivamente condições de processamento II-A e V-A. Os níveis de tensões residuais são fortemente influenciados pelo semi-ângulo de fieira. Usando um semi-ângulo de 20° as tensões são trativas na região superficial, mas menores do que as utilizando o semi-ângulo de 18° devido a efeitos de atrito na região superficial. Para distâncias da superfície maiores que 0,03mm as tensões são mais trativas para semi-ângulos de fieira maior. Este último (e mais importante) efeito para distorção pode ser explicado pela menor área de contato entre a ferramenta e o fio-máquina que para maiores ângulos gera uma zona de deformação superficial e tensões trativas, como demonstrado por diferentes trabalhos [Nakagiri et al, 2001]⁸⁵, [Atienza & Elices, 2004]⁸⁶, [Wang, 2002]⁸⁷.

Tabela 5-17 – Parâmetros de processamento do material, Figura 5-24.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de fieira	Ângulo de PTN
Trefilação	Cond. II-A	Normal	20°	-
Trefilação	Cond. V-A	Normal	18°	-

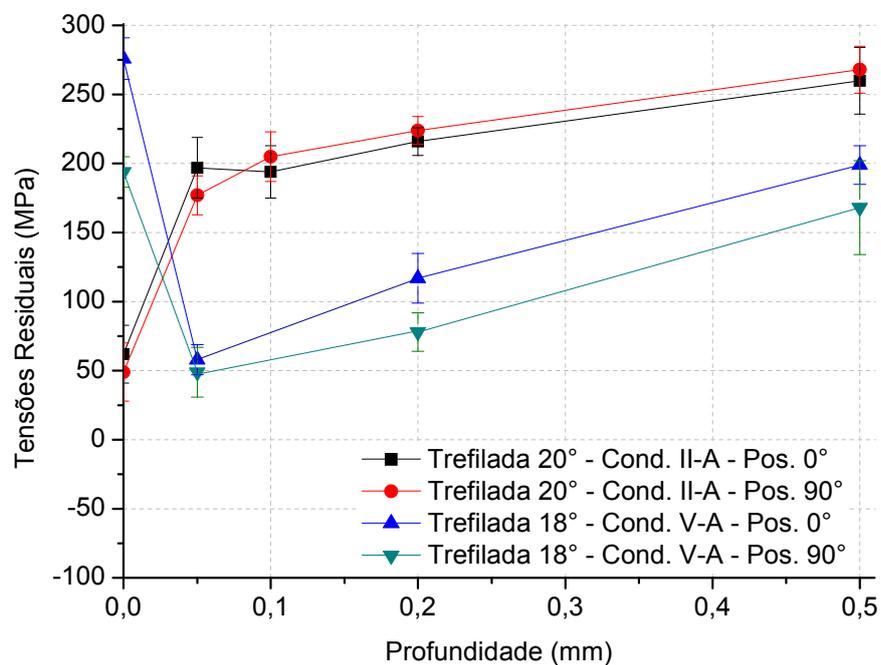


Figura 5-24 - Barra trefilada, perfis de tensões residuais longitudinais obtidos por difração de raios-X - influência do ângulo de fieira, Cond. II-A e Cond. V-A.

5.5.4 Resultados obtidos pelo método do slitting

Na Figura 5-25 observa-se as deflexões apresentadas pela barra trefilada utilizando o método de slitting, o comportamento na superfície (remoções 1 a 4) é trativo e com uma alta deflexão após os ensaios, conforme já demonstraram as outras técnicas de medição para a barra trefilada. O comportamento do material após as remoções 5 e 6 ($\frac{1}{2} \varnothing$) demonstra a existência de tensões trativas. Este comportamento também foi demonstrado em outros trabalhos [Atienza & Elices, 2003]⁴⁸, [Akikazu et al, 2001]⁸⁵, [Wang, 2002]⁸⁷ e [Nakagiri et al, 2000]¹⁴.

Tabela 5-18 – Parâmetros de processamento do material, Figura 5-25.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de fieira	Ângulo de PTN
Trefilação	Cond. II-A	Normal	20°	-

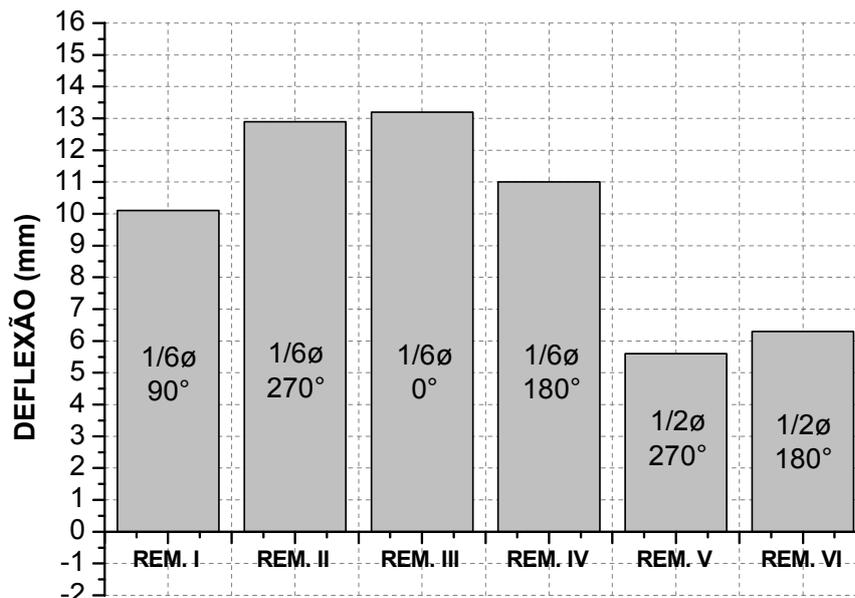


Figura 5-25 - Deflexões apresentadas pela barra após a trefilação, Cond. II-A.

5.6 Tensões residuais na etapa de polimento e endireitamento por rolos cruzados (PTN).

5.6.1 Resultados obtidos por difração de raios-X

Na Figura 5-26, observa-se as tensões residuais longitudinais superficiais para as barras polidas e endireitadas por rolos cruzados com ângulo de 16° (PTN – 16°), as condições de processamento do material são apresentadas na Tabela 5-19. Observa-se que há uma pequena variação superficial de tensões residuais ao longo da posição periférica da barra para as diversas condições de processamento. A causa destas variações pode ser explicado como sendo o efeito do empenamento da barra que é desfeito nesta etapa de processamento, e assim, há estas pequenas variações ao longo do perímetro.

Tabela 5-19 – Parâmetros de processamento do material, Figura 5-26.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de fieira	Ângulo de PTN
PTN	Cond. II-A	Normal	20°	16°
PTN	Cond. III-A	Maior	20°	16°
PTN	Cond. IV-A	Maior	18°	16°
PTN	Cond. V-A	Normal	18°	16°

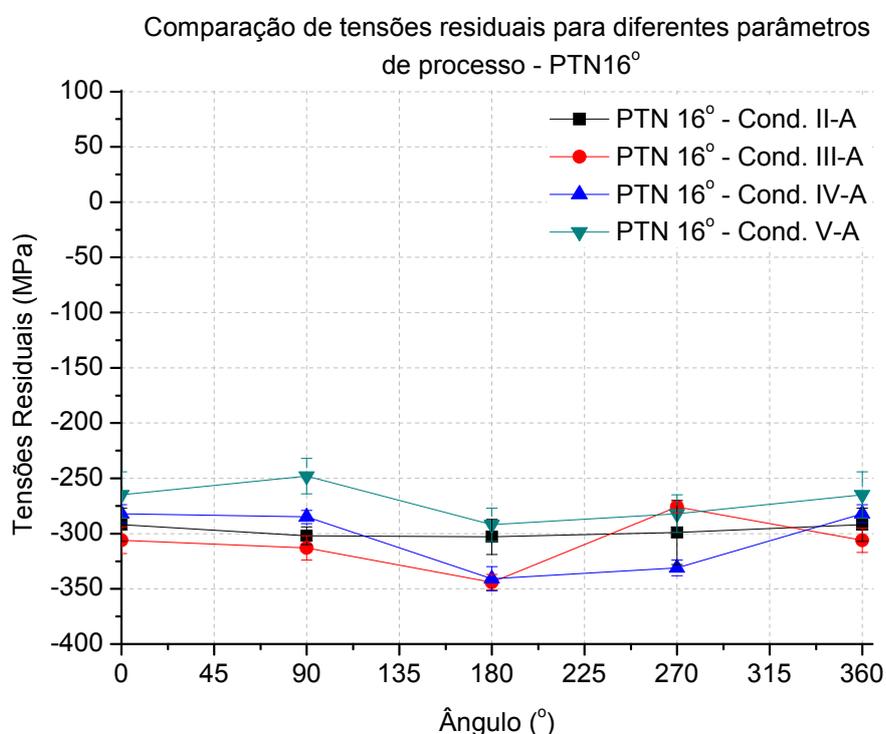


Figura 5-26 – Tensões residuais longitudinais superficiais caracterizadas por difração de raios-X para a barra polida e endireitada por rolos cruzados com ângulo de 16°.

Na Figura 5-27 observa-se as tensões residuais superficiais para a barra polida e endireitada por rolos cruzados com ângulo de 18° (PTN 18°), as condições de processamento do material são apresentadas na Tabela 5-20. Nota-se que o comportamento apresentado para o ângulo de PTN 18° tem um comportamento semelhante ao comportamento do ângulo de 16° comparando-se as tensões residuais superficiais. As tensões variam de -250MPa a -350MPa ao longo da periferia da barra para as diversas condições de processamento do material. Nesta etapa do processo a influência do nível de tensões residuais é dada pelo rolo de polimento (rolo convexo), pois este rolo é que mantém uma maior superfície de contato, efeito de polimento. Existe também uma influência secundária do rolo que causa o endireitamento (rolo côncavo),

pois a variação de tensões e momentos aplicados a barra para executar o endireitamento poderão ocasionar estas diferenças do nível de tensões residuais ao longo da periferia da barra.

Tabela 5-20 – Parâmetros de processamento do material, Figura 5-27.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de fieira	Ângulo de PTN
PTN	Cond. II-B	Normal	20°	18°
PTN	Cond. III-B	Maior	20°	18°
PTN	Cond. IV-B	Maior	18°	18°
PTN	Cond. V-B	Normal	18°	18°

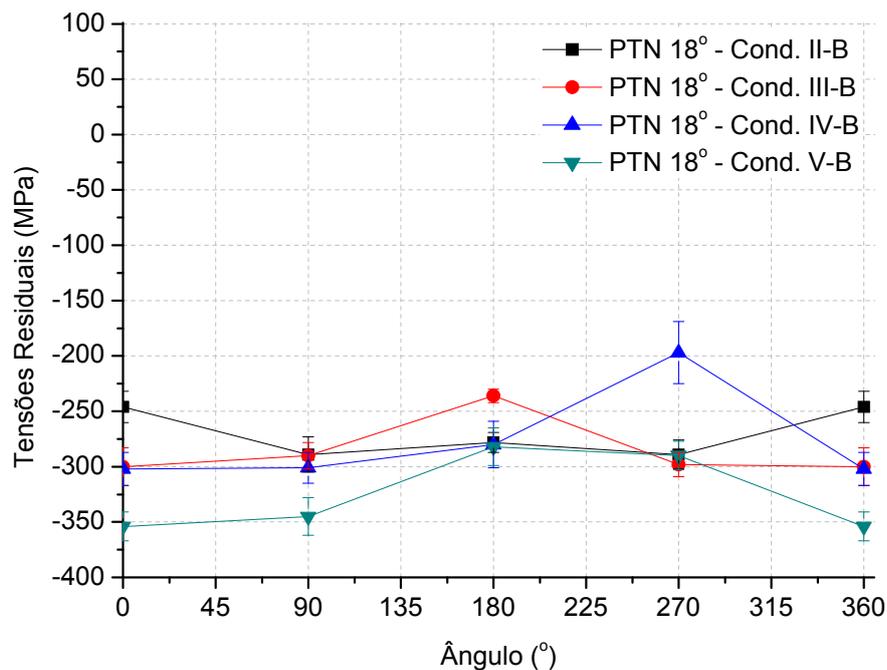


Figura 5-27 - Tensões residuais longitudinais superficiais caracterizadas por difração de raios-X para a barra polida e endireitada por rolos cruzados com ângulo de 18°.

Na Figura 5-28 é apresentada uma comparação no nível de tensões residuais longitudinais desenvolvidas após polimento e endireitamento por rolos cruzados (PTN) com ângulo de 18° para duas amostras retiradas em dias distintos e com a mesma orientação em relação ao maquinário. Como norma industrial, devido as diferenças de processamento do material e o tipo de equipamento utilizado diferenças de tensões residuais

menores que 50MPa não são significativas. Observa-se então que não houve diferenças significativas no processo, comparando-se duas amostras distintas.

Tabela 5-21 – Parâmetros de processamento do material, Figura 5-28.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de fieira	Ângulo de PTN
PTN	Cond. I-B	Normal	20°	18°

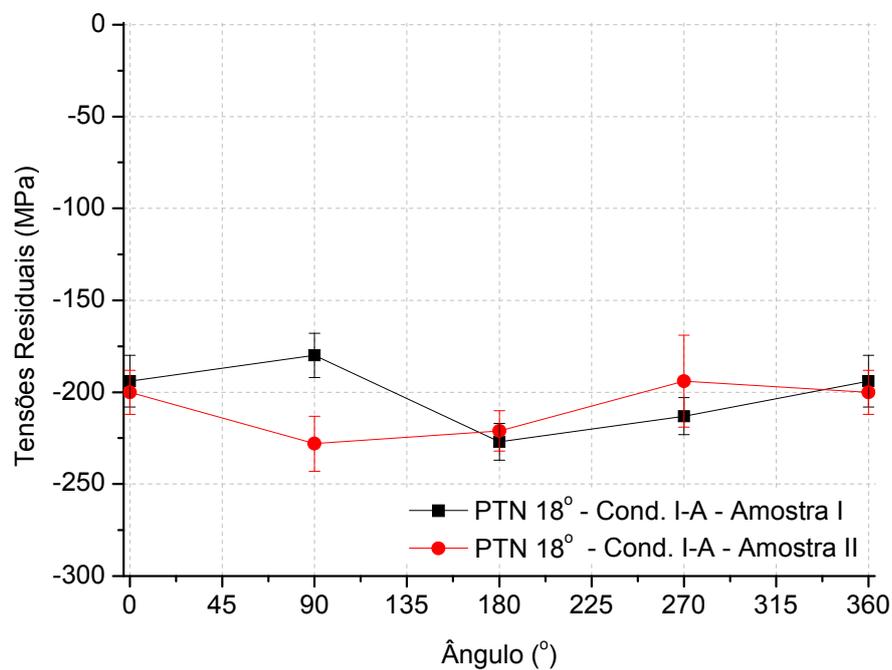


Figura 5-28 - Comparação do nível de tensões residuais longitudinais em duas amostras distintas, PTN 18° Cond. I-A.

Na Figura 5-29 observa-se uma comparação da influência do ângulo de PTN no nível de tensões residuais gerados após o polimento e endireitamento por rolos cruzados – PTN, os parâmetros de processamento do material são mostrados na Tabela 5-22. Nesta figura pode-se observar o nível mais compressivo usando-se um ângulo de 16° em relação ao ângulo de 18°. Também se observa uma comparação da influência da pressão de pré-endireitamento vertical (etapa anterior a trefilação) onde nota-se que para a profundidade analisada 0,5 mm, não houve influência da pressão de pré-endireitamento vertical no nível de tensões residuais após o PTN até a profundidade analisada. As altas tensões residuais compressivas podem ser explicadas pela alta área de contato entre as barras e os rolos com o decréscimo do ângulo dos rolos, resultados semelhantes a estes também foram observados em outro trabalho [Wu et al, 2000]⁸⁸. Outro aspecto importante na geração de tensões residuais durante o polimento e endireitamento por rolos cruzados é a pequena deformação superficial induzida pelo rolo convexo, induzindo na barra tensões

residuais compressivas na superfície. Este nível de tensões mais compressivo sempre é mais favorável para um produto final, aumentando a vida em fadiga do produto, e diminuindo a suscetibilidade a corrosão sob tensão.

Tabela 5-22 – Parâmetros de processamento do material, Figura 5-29.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de fieira	Ângulo de PTN
PTN	Cond. II-A	Normal	20°	16°
PTN	Cond. IV-A	Maior	18°	16°
PTN	Cond. II-B	Normal	20°	18°
PTN	Cond. IV-B	Maior	18°	18°

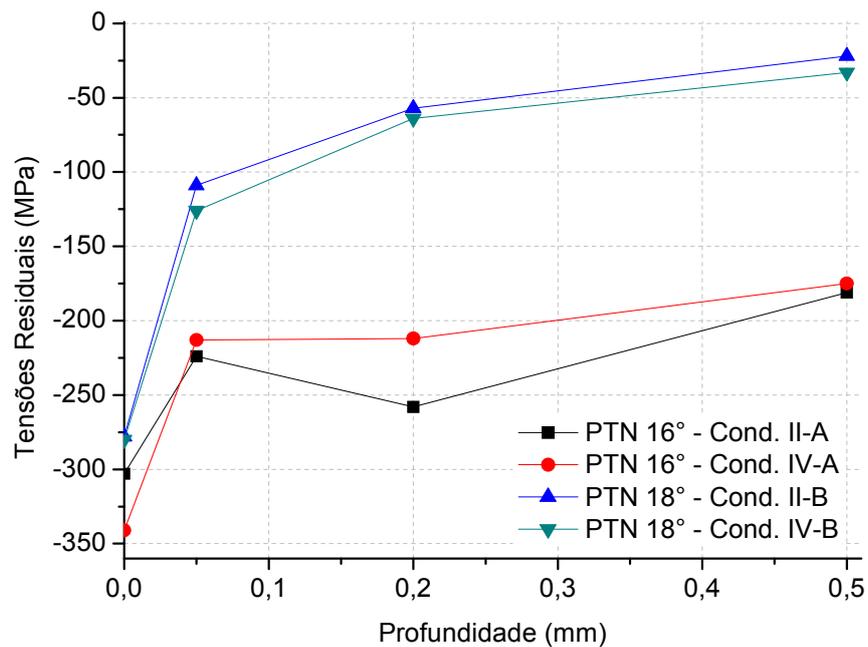


Figura 5-29 - Comparação do nível de tensões residuais longitudinais medidos por difração de raios-X. Barra após o endireitamento e polimento (PTN).

Na Figura 5-30 são apresentados os valores de tensões residuais com remoção de camadas após as etapas de polimento e endireitamento por rolos cruzados (PTN), onde observa-se que o ângulo de PTN de 16° há menores diferenças nos níveis de tensões residuais em relação aos ângulos periféricos de 0° e 180° tendendo a ter valores idênticos. Utilizando um ângulo de 18° no PTN o que ocorre é uma diferença significativa em relação à posição periférica da barra que pode chegar a valores de até 130MPa para 200µm de profundidade. Estas diferenças de tensões residuais ao longo do perímetro da barra utilizando um ângulo

de PTN de 18° estão relacionadas à menor deformação plástica induzida pelo PTN utilizando um ângulo maior. A utilização de um ângulo maior induz menores deformações superficiais na barra e assim as tensões residuais geradas são menores não eliminando totalmente os efeitos da trefilação na superfície da barra polida e endireitada. Desta forma, as diferenças encontradas durante a trefilação ao longo do perímetro da barra não são totalmente eliminadas durante a etapa final do processo (PTN).

Tabela 5-23 – Parâmetros de processamento do material, Figura 5-30.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de fieira	Ângulo de PTN
PTN	Cond. II-A	Normal	20°	16°
PTN	Cond. II-B	Normal	20°	18°

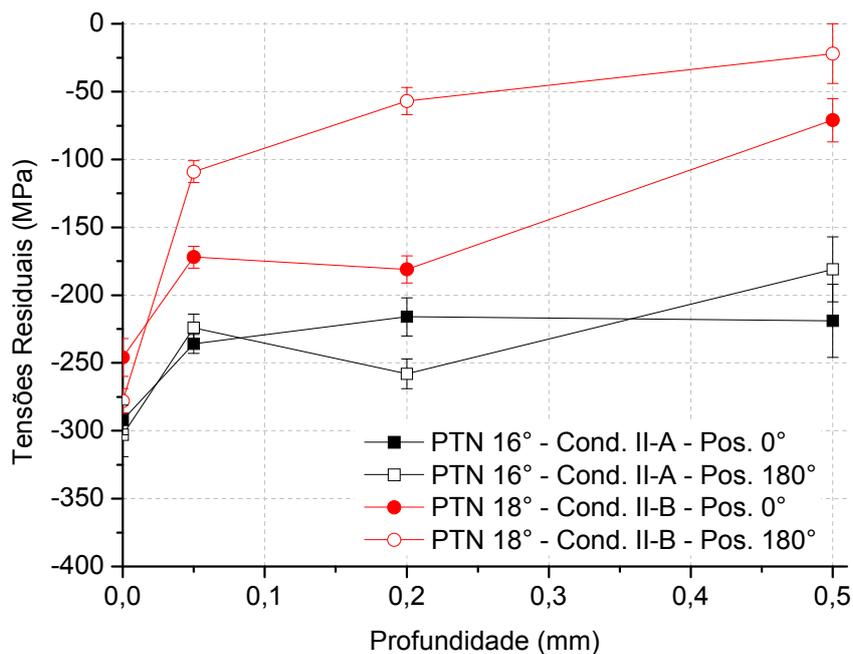


Figura 5-30 - Comparação do nível de tensões residuais longitudinais com remoção de camadas para o PTN 16° e 18°. Cond. II-A e II-B.

5.6.2 Resultados obtidos por hole-drilling

Na Figura 5-32 observa-se os perfis de tensões residuais longitudinais para a barra polida e endireitada por rolos cruzados com ângulo de 18°, utilizando o ângulo de 18° nota-se uma menor diferença entre as condições de processamento do material e para este ângulo de PTN comparando-se as condições de

processamento I (ângulo de fieira de 20°) e a condição IV (ângulo de fieira de 18°) há pouca ou nenhuma influência do ângulo de fieira nas tensões residuais até uma profundidade de 1mm. As tensões residuais apresentam um caráter compressivo na superfície com valores próximos à -300MPa para as Cond. I e IV e de -75MPa para a Cond. III e seguem uma tendência a valores próximos de zero com o aumento da profundidade.

Na Figura 5-31 observa-se a comparação de tensões residuais longitudinais medidas pelas técnicas de difração de raios-X e hole-drilling para a barra polida e endireitada por rolos cruzados com ângulo de 16°, as condições de processamento do material são apresentadas na Tabela 5-24. Nota-se a coerência de resultados medidos nas duas técnicas, as tensões residuais apresentam um comportamento compressivo em profundidades próximas a superfície e tendem a valores menos compressivos a partir de 0,5 mm medidos pela técnica de difração de raios-X e trativos para as medições via hole-drilling para esta mesma profundidade. Apesar da diferença de comportamento das tensões após 0,5mm os resultados obtidos nas duas técnicas apresentam-se coerentes, seguindo uma mesma tendência de comportamento.

Tabela 5-24 – Parâmetros de processamento do material, Figura 5-31.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de fieira	Ângulo de PTN
PTN	Cond. I-A	Normal	20°	16°

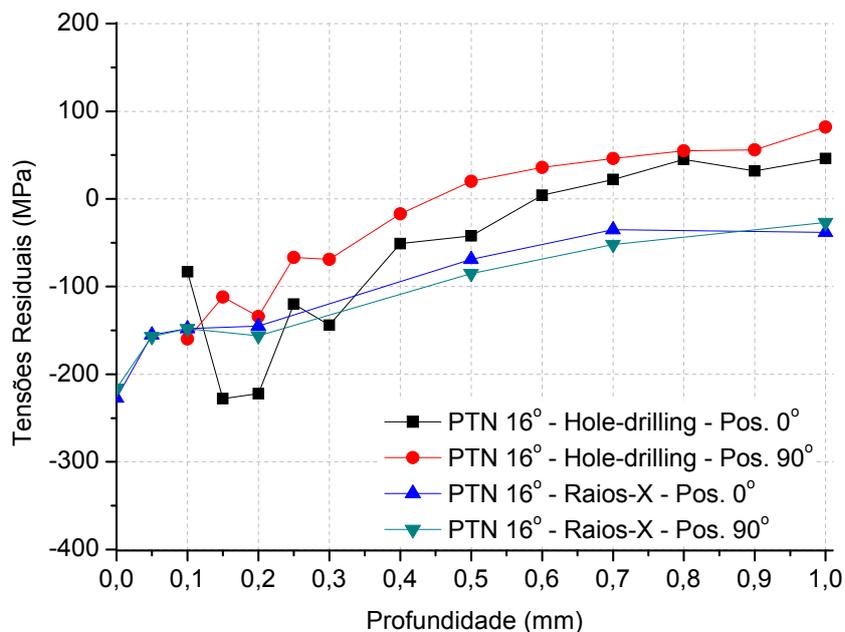


Figura 5-31 - Comparação de tensões residuais longitudinais medidas utilizando as técnicas de hole-drilling e difração de raios-X após o polimento e endireitamento por rolos cruzados com ângulo de 16°, Cond. I-A.

Na Figura 5-32, observa-se o perfil de tensões residuais longitudinais após o polimento e endireitamento por rolos cruzados (PTN) para a posição periférica da barra de 0°, as condições de processamento do material são apresentadas na Tabela 5-25. Para os ângulos de PTN analisados, as tensões são compressivas para profundidades próximas a superfície e mantêm-se compressivas até uma profundidade de 1mm. Para as condições de processamento do material mostradas na Tabela 5-25 não houve diferenças significativas no perfil de tensões residuais. A utilização de um ângulo de PTN maior induz deformações plásticas mais superficiais em relação a ângulos menores e desta forma as diferenças de tensões residuais ocasionadas em etapas anteriores são mais facilmente eliminadas.

Tabela 5-25 – Parâmetros de processamento do material, Figura 5-32.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de fieira	Ângulo de PTN
PTN	Cond. II-B	Normal	20°	18°
PTN	Cond. IV-B	Maior	18°	18°
PTN	Cond. V-B	Normal	18°	18°

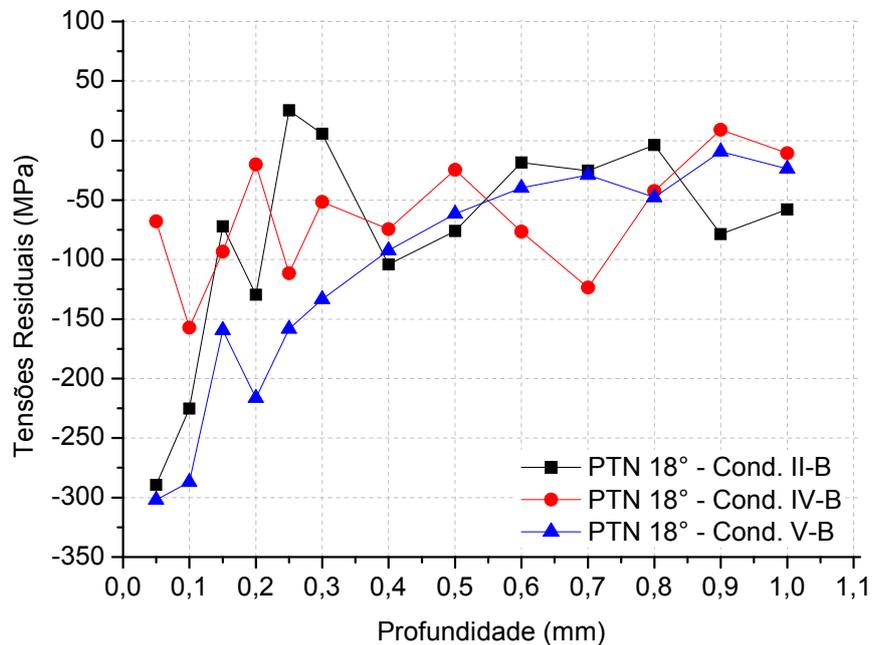


Figura 5-32 - Perfis de tensões residuais longitudinais após o polimento e endireitamento por rolos cruzados com ângulo de 18°, posição 0°.

Na Figura 5-33, observa-se o perfil de tensões residuais longitudinais após o polimento e endireitamento por rolos cruzados (PTN) para a posição periférica da barra de 0°, as condições de processamento do material são apresentadas na Tabela 5-26. Para qualquer ângulo de PTN utilizado as tensões são compressivas para profundidades próximas a superfície e mantêm-se compressivas até uma profundidade de 1mm. Uma

comparação do ângulo de PTN utilizado indica que ângulos menores, como por exemplo, 15° e 16° induzem tensões mais compressivas próximas à superfície e a tendência destas tensões residuais a chegar a valores próximos a zero ocorre para uma profundidade maior 0,7mm utilizando-se o ângulo de fieira de 16°. Para ângulos de PTN maiores, como por exemplo, 18° as tensões são menos trativas em relação aos ângulos menores, também observa-se que utilizando um ângulo de PTN maior há uma tendência dos níveis de tensões residuais aproximarem-se de zero a profundidades menores utilizando-se o ângulo de fieira de 16°.

Tabela 5-26 – Parâmetros de processamento do material, Figura 5-33.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de fieira	Ângulo de PTN
PTN	Cond. VI-A	Normal	16°	15°
PTN	Cond. VI-B	Normal	16°	16°
PTN	Cond. VI-C	Normal	16°	18°

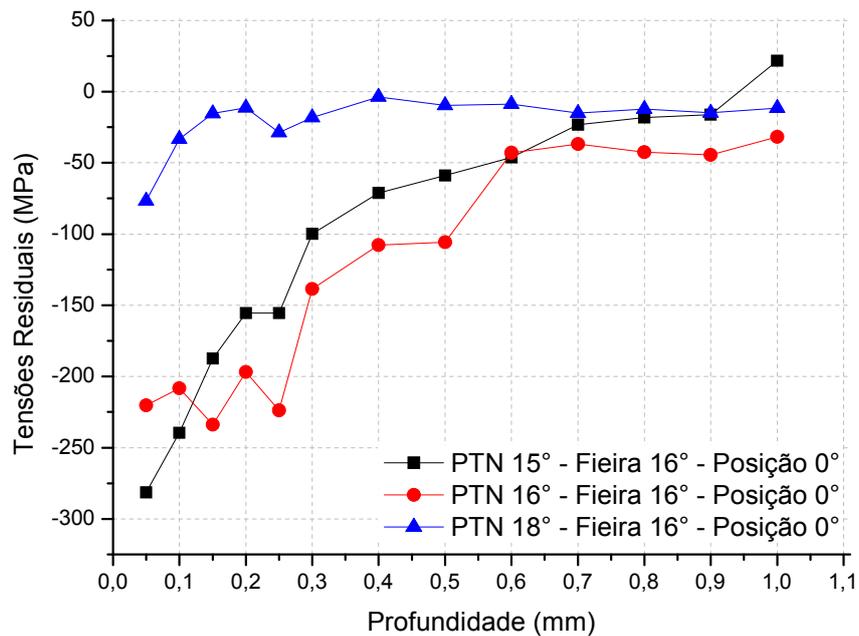


Figura 5-33 - Tensões residuais longitudinais após o polimento e endireitamento por rolos cruzados (PTN) para diferentes ângulos de PTN utilizando um ângulo de fieira de 16°, Cond. VI-A, VI-B e VI-C.

Na Figura 5-34 observa-se as tensões residuais longitudinais após o PTN com um ângulo de fieira de 16° para a posição periférica da barra de 180°, as condições de processamento do material são apresentadas na Tabela 5-27. As tensões residuais apresentam comportamento compressivo para profundidades próximas a superfície tendendo a valores compressivos até a profundidade de 1mm (analisada).

Tabela 5-27 – Parâmetros de processamento do material, Figura 5-34.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de fieira	Ângulo de PTN
PTN	Cond. VI-A	Normal	16°	15°
PTN	Cond. VI-B	Normal	16°	16°
PTN	Cond. VI-C	Normal	16°	18°

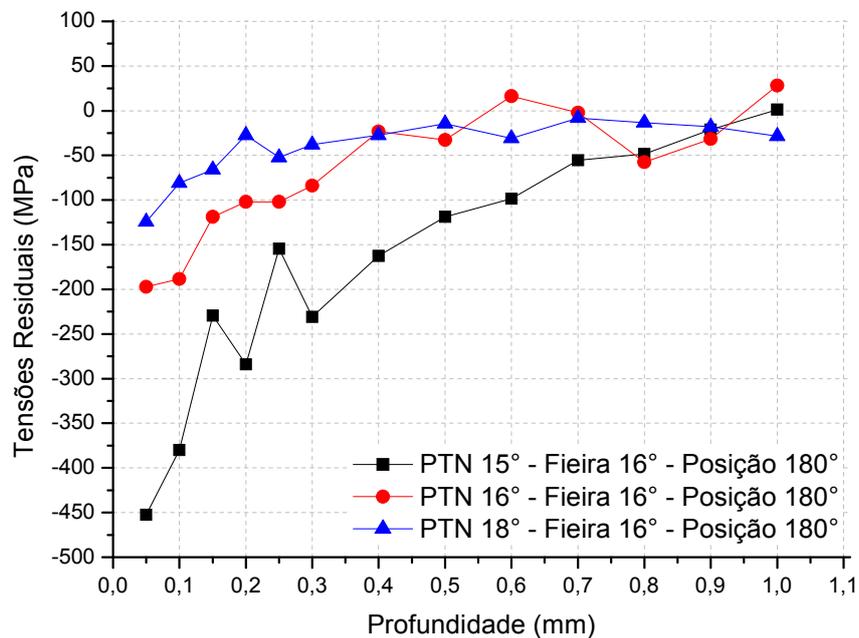


Figura 5-34 - Tensões residuais longitudinais após o polimento e endireitamento por rolos cruzados (PTN) para diferentes ângulos de PTN utilizando um ângulo de fieira de 16°, Cond. VI-A, VI-B e VI-C.

Na Figura 5-35 observa-se o perfil de tensões residuais longitudinais após o PTN utilizando-se uma fieira de 15° para a posição periférica da barra de 0°, em todos os ângulos utilizados no PTN as tensões são compressivas na superfície e os valores são próximos de -275MPa com uma tendência de ângulos menores de PTN produzirem tensões residuais mais compressivas. Comparando-se os ângulos de fieira de 15° (Figura 5-35) e 16°(Figura 5-33) utilizados, nota-se que o ângulo de 15° induz menores diferenças de tensões residuais ao longo da profundidade analisada em relação a posição periférica independente do ângulo de PTN utilizado, este comportamento não ocorreu para o ângulo de fieira de 16°, ficando evidente uma diferença entre os ângulos de 15° - 16° comparados com o ângulo de 18°. Comparando-se as tensões residuais ao longo do perímetro da barra Figura 5-36 observa-se que o ângulo de PTN 18° induz tensões mais homogêneas ao longo do perímetro da barra comparado-se com o ângulo de PTN 15°.

Tabela 5-28 – Parâmetros de processamento do material, Figura 5-35.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de fieira	Ângulo de PTN
PTN	Cond. VII-A	Normal	15°	15°
PTN	Cond. VII-B	Normal	15°	16°
PTN	Cond. VII-C	Normal	15°	18°

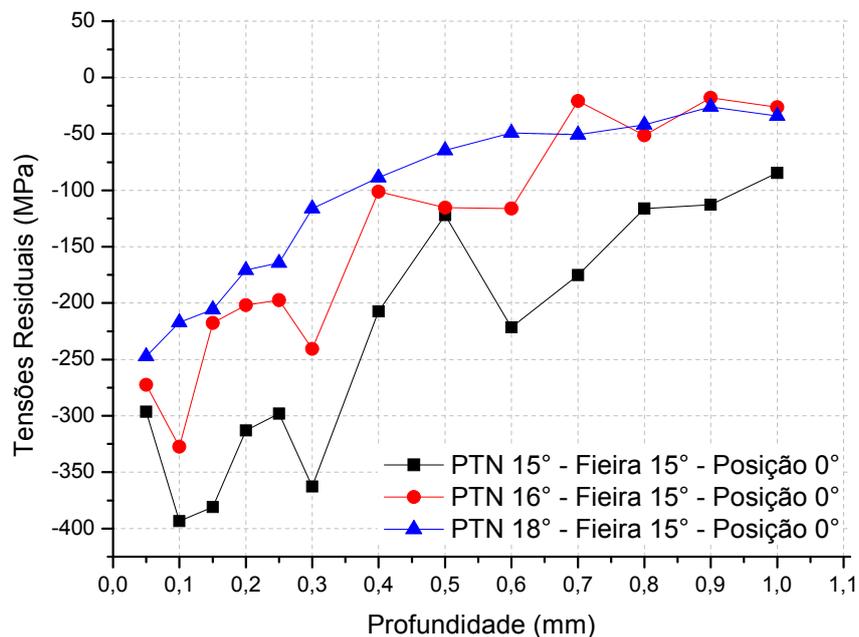


Figura 5-35 – Tensões residuais longitudinais após o polimento e endireitamento por rolos cruzados (PTN) para diferentes ângulos de PTN utilizando um ângulo de fieira de 15°, Cond. VII-A, VII-B e VII-C.

Na Figura 5-36 observa-se o perfil de tensões residuais longitudinais após o PTN utilizando-se uma fieira de 15° para a posição periférica da barra de 180°, as condições de processamento do material são apresentadas na Tabela 5-28. Em todos os ângulos utilizados no PTN as tensões são compressivas na superfície e os valores são próximos de -275MPa com uma tendência do ângulo de PTN 15° induzir tensões residuais mais compressivas, os ângulos de PTN de 16° e 18° para esta posição periférica da barra têm comportamentos semelhantes.

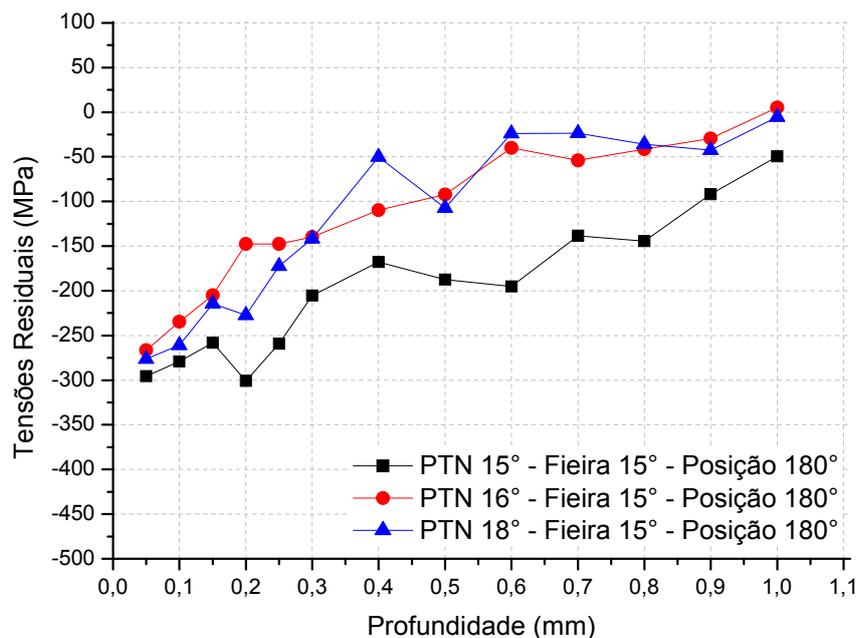


Figura 5-36 - Tensões residuais longitudinais após o polimento e endireitamento por rolos cruzados (PTN) para diferentes ângulos de PTN utilizando um ângulo de feira de 15°, Cond. VII-A, VII-B e VII-C.

Na Figura 5-37 observa-se o perfil de tensões residuais longitudinais medidos pela técnica de hole-drilling para a barra após o PTN com ângulos de 15° e 18°, as condições de processamento do material são apresentadas na Tabela 5-29. As tensões residuais induzidas no PTN 15° são mais compressivas em profundidades próximas a superfície comparando-se com o ângulo de 18°. Utilizando ângulos menores de PTN, por exemplo, 15°, ocorre uma deformação plástica maior induzindo assim tensões mais compressivas, independente do ângulo de feira utilizado. Após uma profundidade de 0,9mm as tensões residuais tendem a valores idênticos aproximando-se de zero.

Tabela 5-29 – Parâmetros de processamento do material, Figura 5-37.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de feira	Ângulo de PTN
PTN	Cond. VI-A	Normal	16°	15°
PTN	Cond. VI-C	Normal	16°	18°

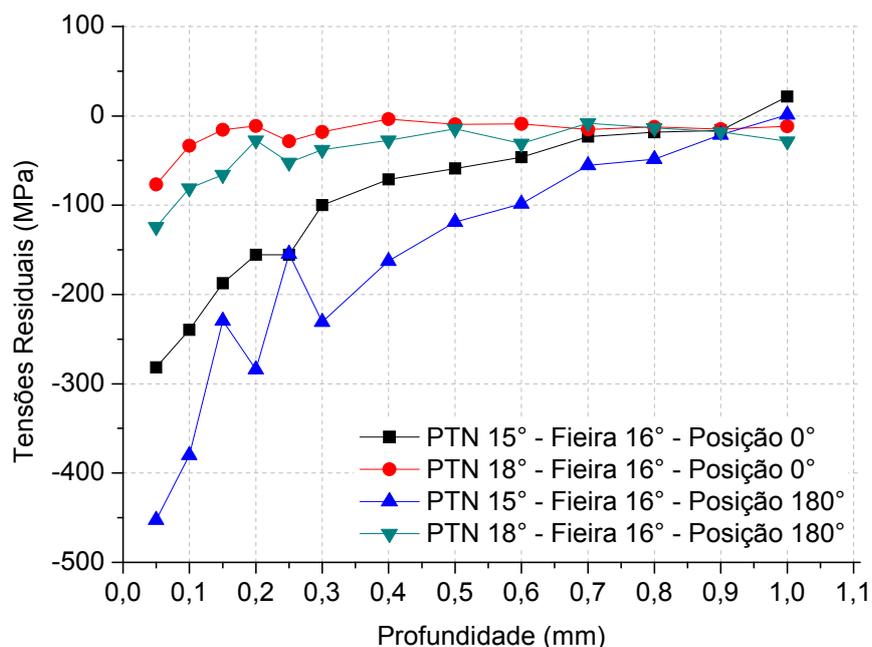


Figura 5-37 - Comparação da variação de tensões residuais longitudinais ao longo do perímetro das barras após o PTN, com ângulos de PTN 15° e 18°, Cond. VI-A e VI-C.

Na Figura 5-38 observa-se uma comparação das tensões residuais longitudinais ao longo do perímetro da barra após o PTN utilizando um ângulo de feira de 15° e dois ângulos distintos de PTN 15° e 18°, as condições de processamento do material são apresentadas na Tabela 5-30. Para profundidades próximas a superfície nas duas condições de PTN (15° e 18°) as tensões residuais apresentam comportamentos compressivos com valores muito próximos, comparando-se a variação das tensões residuais ao longo do perímetro da barra observa-se que o ângulo de PTN 18° induz tensões residuais de forma mais homogênea ao longo do perímetro em relação ao ângulo de 15°, sendo este comportamento mais desejado em um produto final com o intuito de minimizar distorções.

Tabela 5-30 – Parâmetros de processamento do material, Figura 5-38.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de feira	Ângulo de PTN
PTN	Cond. VII-A	Normal	16°	15°
PTN	Cond. VII-C	Normal	16°	18°

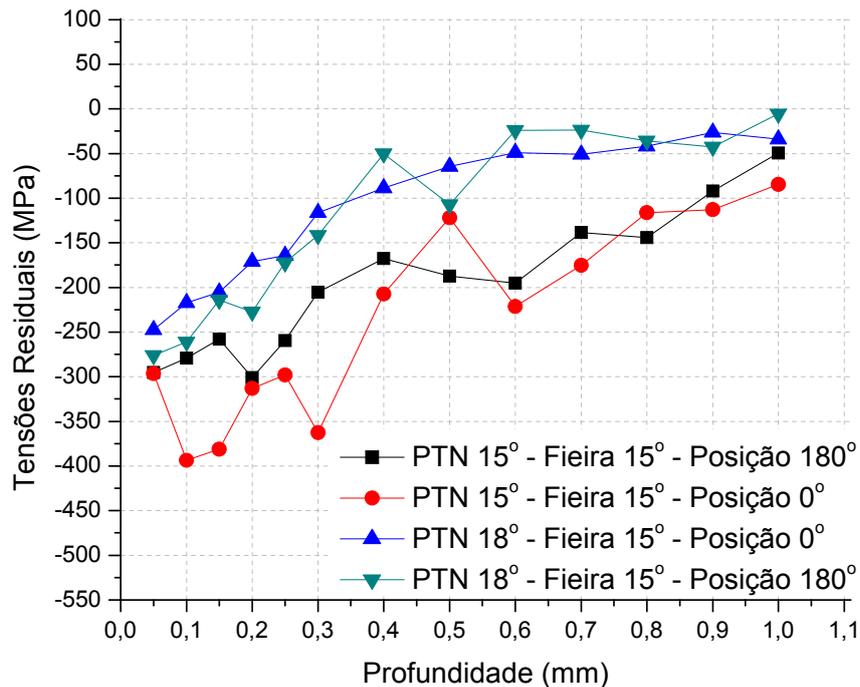


Figura 5-38 – Comparação de tensões residuais longitudinais em relação ao ângulo periférico após o polimento e endireitamento por rolos cruzados (PTN) para diferentes ângulos de PTN utilizando um ângulo de feira de 15°, Cond. VII-A e VII-C.

Na Figura 5-39 observa-se o perfil de tensões residuais longitudinais para a barra após o PTN com ângulo de 16°, as demais condições de processamento do material são mostradas na Tabela 5-31. Este perfil segue até uma profundidade de 2,0mm utilizando-se o método de hole-drilling, para a execução deste perfil foi realizado primeiramente a instrumentação e o furo até uma profundidade de 1mm. Posteriormente foi realizada uma usinagem no ponto medido até uma profundidade de 0,85mm tomando-se o cuidado de não utilizar uma velocidade de avanço de ferramenta alto para que não houvesse alterações no nível de tensões residuais [Yu & Lau, 1999]⁸⁹, [Mohamed et al, 2008]⁹⁰. Observa-se o nível de tensões residuais compressivo a uma profundidade de 0,05mm da barra (-110MPa) e após uma profundidade de 0,25mm estas tensões mudam para trativas, mantendo um valor médio constante de 25MPa até uma profundidade de 1,25mm. Após esta profundidade há um incremento nas tensões residuais trativas para valores médios de 50MPa até a profundidade analisada de 2,0mm.

Tabela 5-31 – Parâmetros de processamento do material, Figura 5-39.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de feira	Ângulo de PTN
PTN	Cond. I-A	Normal	20°	16°

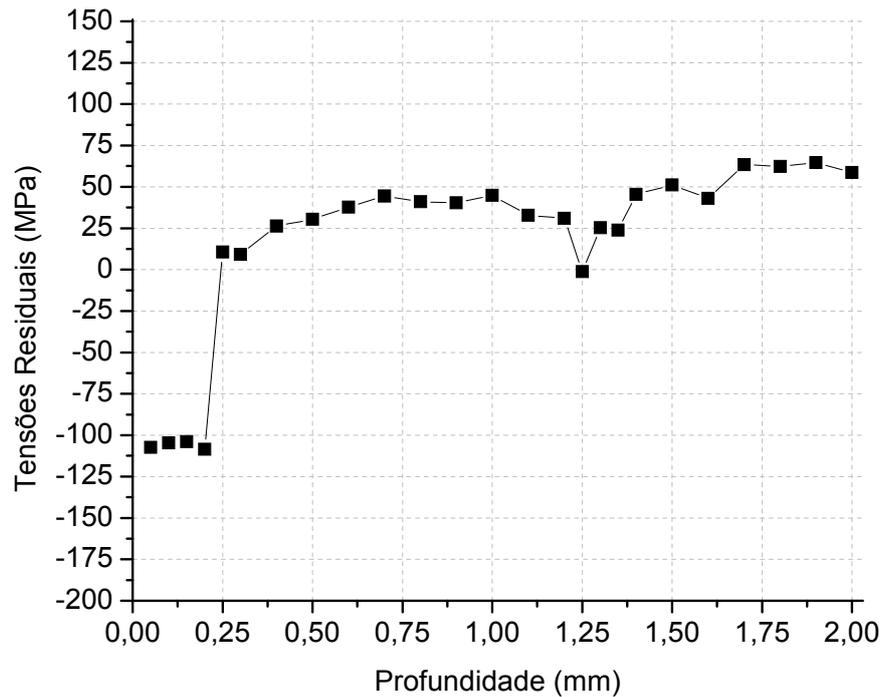


Figura 5-39 - Tensões residuais longitudinais após o polimento e endireitamento por rolos cruzados PTN 16° (Cond. I-A), com remoção de camada por usinagem.

5.6.3 Resultados obtidos pelo método do slitting

Na Figura 5-40 observam-se os resultados para a barra endireitada e polida por rolos cruzados (PTN) com ângulo de 16°, as condições de processamento do material são mostradas na Tabela 5-32. O comportamento das tensões residuais estimadas a partir das deflexões na superfície da barra (remoções 1 a 4) apresentam caráter compressivo. Não houve grandes variações ao longo da posição periférica da barra, considerando as remoções 5 e 6 ($1/2 \varnothing$) as tensões mudam o comportamento para trativo.

Tabela 5-32 – Parâmetros de processamento do material, Figura 5-40.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de fieira	Ângulo de PTN
PTN	Cond. II-A	Normal	20°	16°

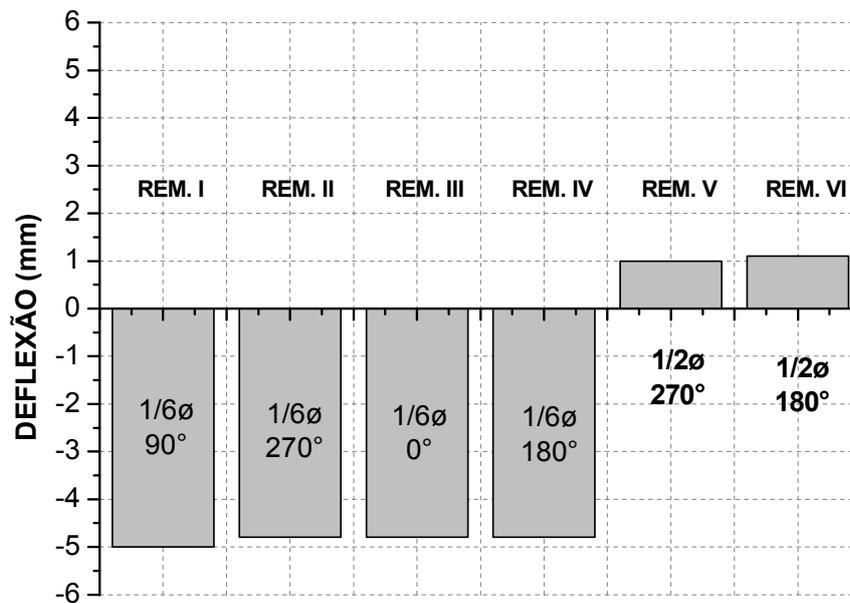


Figura 5-40 - Deflexões apresentadas pela barra após o endireitamento por rolos cruzados (PTN 16°), Cond. II-A.

Na Figura 5-41 observa-se o comportamento apresentado pela barra com ângulo de endireitamento e polimento por rolos cruzados (PTN) com ângulo de 18°, as condições de processamento do material são mostradas na Tabela 5-33. O comportamento é compressivo na superfície 1/6 \varnothing e trativo considerando 1/2 \varnothing da barra. Comparando-se os resultados apresentados pelo ângulo de PTN 18° com o ângulo de PTN 16° nota-se um nível menos compressivo na superfície da barra e um comportamento trativo em 1/2 \varnothing da barra semelhante ao apresentado pelo ângulo de PTN 16°.

Tabela 5-33 – Parâmetros de processamento do material, Figura 5-41.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de fieira	Ângulo de PTN
PTN	Cond. II-B	Normal	20°	18°

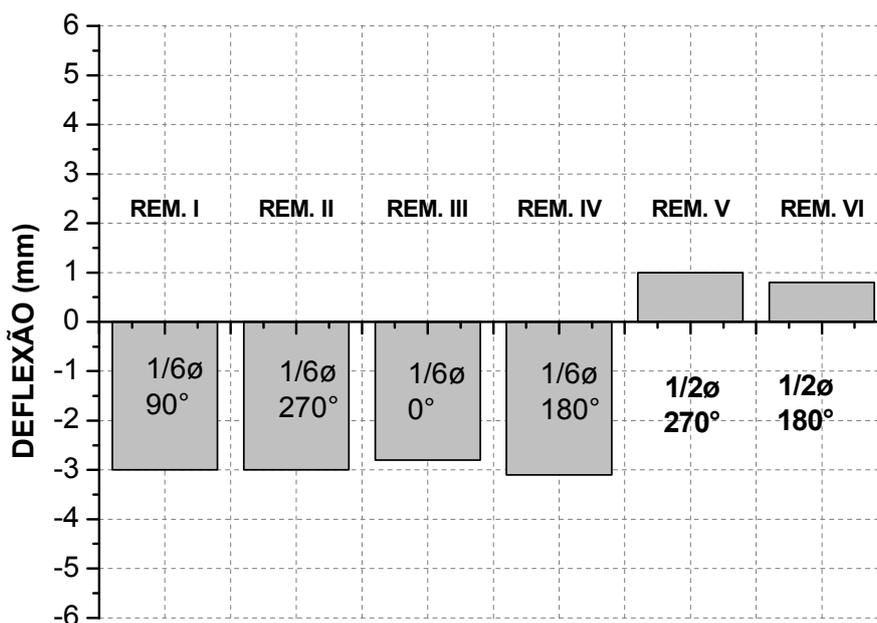


Figura 5-41 - Deflexões apresentadas pela barra após o endireitamento por rolos cruzados (PTN 18°), Cond. II-B.

5.7 Visão global de tensões residuais na trefilação combinada.

Na Figura 5-42 são apresentadas as médias dos níveis de tensões residuais longitudinais superficiais medidos por difração de raios-X ao longo do perímetro da barra para cada etapa do processo e para cada variação de parâmetro utilizado na segunda amostragem. A barra de erros apresentada na figura representa o desvio padrão da média das tensões residuais longitudinais superficiais calculadas. As condições de processamento do material na segunda amostragem são mostrados na Tabela 5-34. No pré-endireitamento há uma variação na média do nível de tensões residuais e de acordo com a pressão utilizada nos rolos de pré-endireitamento vertical estas tensões podem variar de trativas para a condição de processamento II-A a compressivas para a condição de processamento III-A, porém este nível de variação é baixo. No processo de jateamento com granalhas o nível de tensões residuais é compressivo e apresenta valores de aproximadamente -320MPa para a condição II-A. Ainda no jateamento, observa-se que para a Cond. III-A a variação em relação ao perímetro da barra é maior do que a variação em relação a Cond. II-A. Na etapa de trefilação o nível de tensões residuais apresenta-se trativo para as quatro condições de processamento independente dos semi-ângulos de fieira utilizados, ou seja, 20° e 18°. Para a etapa de endireitamento e polimento por rolos cruzados – PTN, independente do ângulo utilizado o nível de tensões residuais é compressivo na superfície. Nota-se também que utilizando um ângulo de 16° e a condição de processamento II-A há uma maior homogeneidade do nível de tensões residuais superficiais ao longo do perímetro da barra.

Tabela 5-34 – Parâmetros de processamento do material, referentes à Figura 5-42, segunda amostragem.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de fieira	Ângulo de PTN
Pré-End.	Cond. II-A	Normal	-	-
Pré-End.	Cond. III-A	Maior	-	-
Jateamento	Cond. II-A	Normal	-	-
Jateamento	Cond. III-A	Maior	-	-
Trefilação	Cond. II-A	Normal	20°	-
Trefilação	Cond. III-A	Maior	20°	-
Trefilação	Cond. IV-A	Maior	18°	-
Trefilação	Cond. V-A	Normal	18°	-
PTN	Cond. II-A	Normal	20°	16°
PTN	Cond. III-A	Maior	20°	16°
PTN	Cond. IV-A	Maior	18°	16°
PTN	Cond. V-A	Normal	18°	16°
PTN	Cond. II-B	Normal	20°	18°
PTN	Cond. III-B	Maior	20°	18°
PTN	Cond. IV-B	Maior	18°	18°
PTN	Cond. V-B	Normal	18°	18°

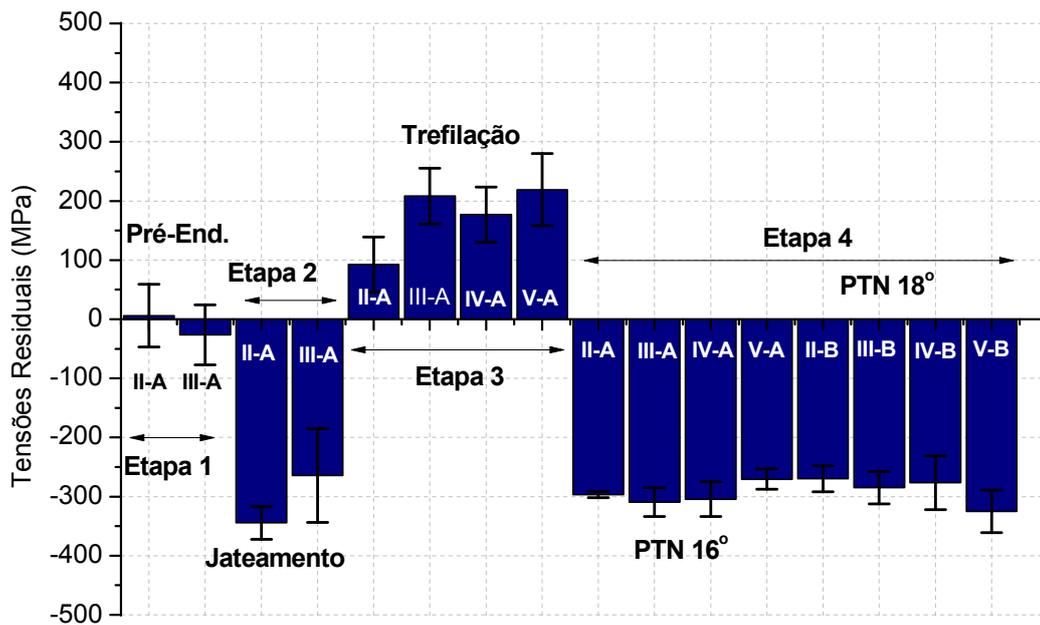


Figura 5-42 - Média de tensões residuais longitudinais superficiais em cada etapa do processo, segunda amostragem caracterizados por difração de raios-X.

A Figura 5-43 apresenta as tensões residuais longitudinais na superfície como função da posição periférica. As condições de processamento do material são apresentadas na Tabela 5-35. Após cada etapa do processo de trefilação combinada. Observa-se que a influência do pré-endireitamento é mantida na superfície da amostra após a etapa de trefilação, mesmo a amostra sendo jateada por granalhas após o pré-endireitamento e antes de ser trefilada. Este comportamento ocorre para todas as condições de processamento do material, o que também pode ser observado na Figura 5-44.

Tabela 5-35 – Parâmetros de processamento do material, Figura 5-43.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de feira	Ângulo de PTN
Pré-End.	Cond. II-A	Normal	-	-
Jateamento	Cond. II-A	Normal	-	-
Trefilação	Cond. II-A	Normal	20°	-
PTN	Cond. II-A	Normal	20°	16°
PTN	Cond. II-B	Normal	20°	18°

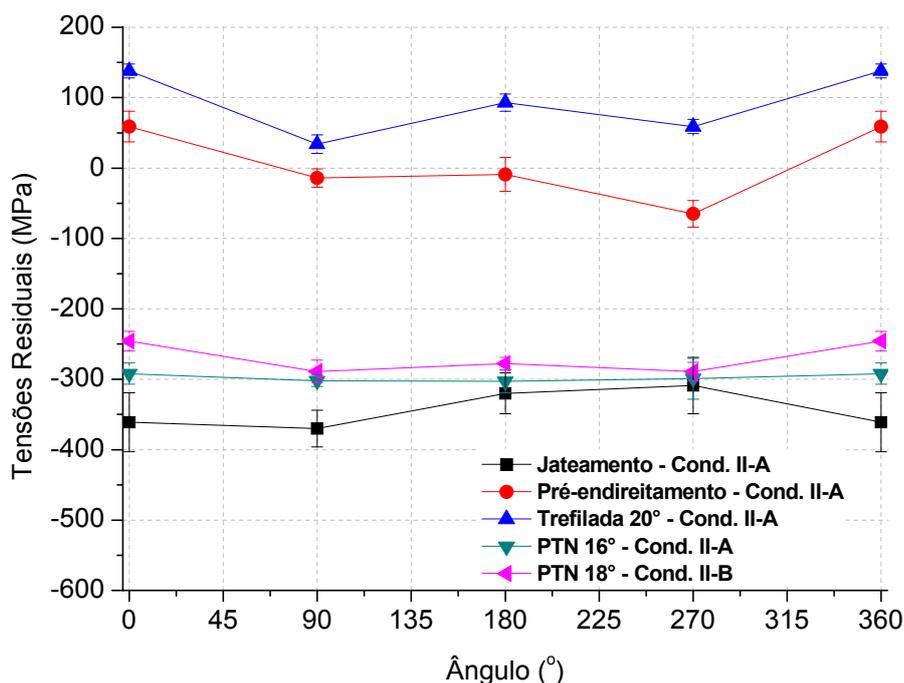


Figura 5-43 - Tensões residuais longitudinais superficiais medidos pelo método de difração de raios-X desenvolvidas nas principais etapas do processo de trefilação combinada, Cond. II-A e Cond. II-B.

Na Figura 5-44 é mostrada uma comparação entre as tensões residuais longitudinais superficiais do fio-máquina pré-endireitado e a barra trefilada medidos por difração de raios-X, os parâmetros utilizados durante o processamento do material são apresentados na Tabela 5-36. Nesta figura fica evidente a permanência dos efeitos do pré-endireitamento na barra trefilada, o comportamento apresentado pelo fio-máquina é semelhante ao comportamento apresentado pela barra trefilada, mesmo alterando parâmetros do processo, semi-ângulo de fieira. Observa-se também que há uma etapa entre o pré-endireitamento e a trefilação que é o jateamento, e este jateamento não elimina o estas diferenças ao longo do perímetro do fio-máquina, como demonstrados na figura. Este comportamento pode ser associado ao formato inicial do fio-máquina (rolo) e também a efeitos de empenamentos das barras durante o processamento do material.

Tabela 5-36 – Parâmetros de processamento do material, Figura 5-44.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de fieira	Ângulo de PTN
Pré-End.	Cond. II-A	Normal	-	-
Trefilação	Cond. II-A	Normal	20°	-
Trefilação	Cond. V-A	Normal	18°	-

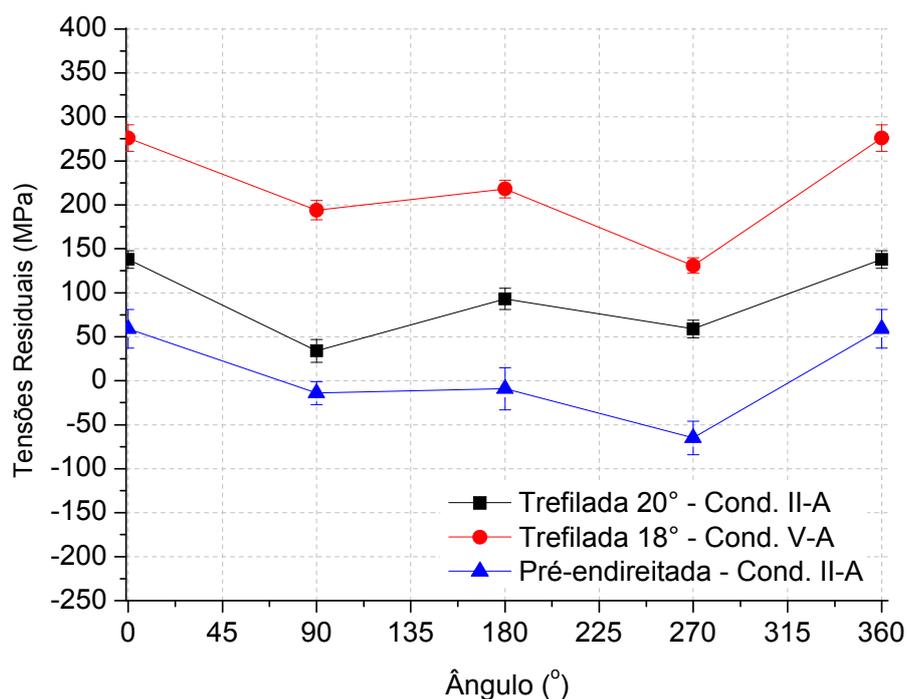


Figura 5-44 – Comparação das tensões residuais longitudinais após o pré-endireitamento com as tensões residuais longitudinais após a trefilação.

Comparando-se os perfis de tensões residuais longitudinais da Figura 5-45 (0° e 90°) para o pré-endireitamento, observa-se uma diferença significativa no nível de tensões residuais, na posição de 90° mostrado na Figura 5-46 são mais compressivas em relação à posição 0° mostrado na Figura 5-45. Esta diferença está relacionada aos diferentes níveis de deformações aplicados nos rolos de pré-endireitamento vertical e horizontal, isto se deve ao formato inicial do fio-máquina ser em rolo. Desta forma o nível de tensões aplicado no material na parte superior e inferior (0° e 180°) deve ser muito menor do que o nível de tensões aplicado nas laterais (90° e 270°), ocasionando desta forma diferença no nível de tensões residuais.

A etapa de jateamento induz tensões compressivas na superfície devido à deformação plástica imposta pelas granalhas. Comparando-se os resultados obtidos na mesma orientação do fio-máquina pré-endireitado e na mesma posição (0°) pode-se observar um diminuição de aproximadamente 300Mpa (na direção de compressão) nas tensões residuais presentes na superfície do material. Na posição periférica de 90° as tensões residuais apresentam comportamento compressivo apresentando níveis de tensões mais compressivos com relação ao ângulo periférico de 0°.

Na Figura 5-45 são apresentadas as tensões residuais longitudinais após a etapa de trefilação para as duas orientações (0° e 90°), neste gráfico é possível observar a permanência das diferenças de tensões residuais após a trefilação ocasionada pela etapa de pré-endireitamento. Também observa-se o alto nível de tensões residuais trativas na superfície da barra. Para a etapa de trefilação as tensões residuais apresentam um comportamento trativo, como já foi demonstrado em vários trabalhos [Dieter, 1986]⁹³, [Nakagiri, 2001]⁹⁴, [Dieter & Kuhn, 2005]⁹⁵, [Rodrigues & Martins, 2005]⁹⁶, [Atienza et al, 2003]⁹⁷, [Atienza & Eices, 2004]⁹⁸ e

[Atienza e Elices, 2005]⁹⁹. Comparando-se as posições periféricas de 0° e 90°, observa-se maiores diferenças para pequenas profundidades em relação a superfície, estas diferenças tendem a serem menores com o aumento da profundidade até 0,7mm.

Tabela 5-37 – Parâmetros de processamento do material, Figura 5-45.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de fieira	Ângulo de PTN
Pré-End.	Cond. I-A	Normal	-	-
Jateamento	Cond. I-A	Normal	-	-
Trefilação	Cond. I-A	Normal	20°	-

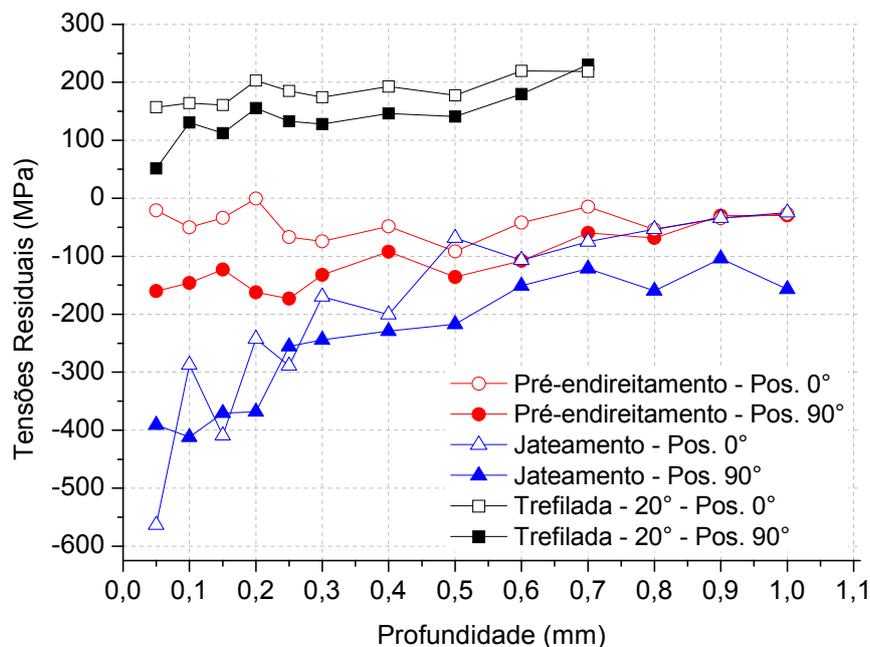


Figura 5-45 – Perfis de tensões residuais longitudinais medidos por hole-drilling para as etapas de pré-endireitamento, jateamento e trefilação, orientação em relação ao maquinário 0° e 90°, Cond. I-A.

Na Figura 5-46, após o polimento e endireitamento por rolos cruzados (PTN) com ângulo de 16° significativa deformação é introduzida na superfície, fazendo com que os valores mudem para compressão novamente. Observa-se também uma tendência dos valores tornarem-se trativos após 0,5mm a 0,6 mm de profundidade da superfície na posição de 0° e 90°. Os parâmetros de processamento do material são mostrados na Tabela 5-38.

Na Figura 5-46 observa-se o comportamento do nível de tensões residuais longitudinais presentes na superfície da barra após o polimento e endireitamento por rolos cruzados com ângulo de 18° (PTN 18°) onde

pode-se notar que a diferença entre as tensões residuais nas posições 0° e 90° observada em etapas anteriores do processo se torna imperceptível. Observa-se também que o nível de tensões residuais é trativo na após uma profundidade de 0,1mm tendendo a aumentar conforme aumenta a profundidade até um valor máximo, porém este valor não pode ser determinado devido à profundidade máxima de medida do método de hole-drilling (1,0mm). O comportamento do nível de tensões no núcleo da barra não pode ser determinado por este método.

Tabela 5-38 – Parâmetros de processamento do material, Figura 5-46.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de fieira	Ângulo de PTN
PTN	Cond. I-A	Normal	20°	16°
PTN	Cond. I-B	Normal	20°	18°

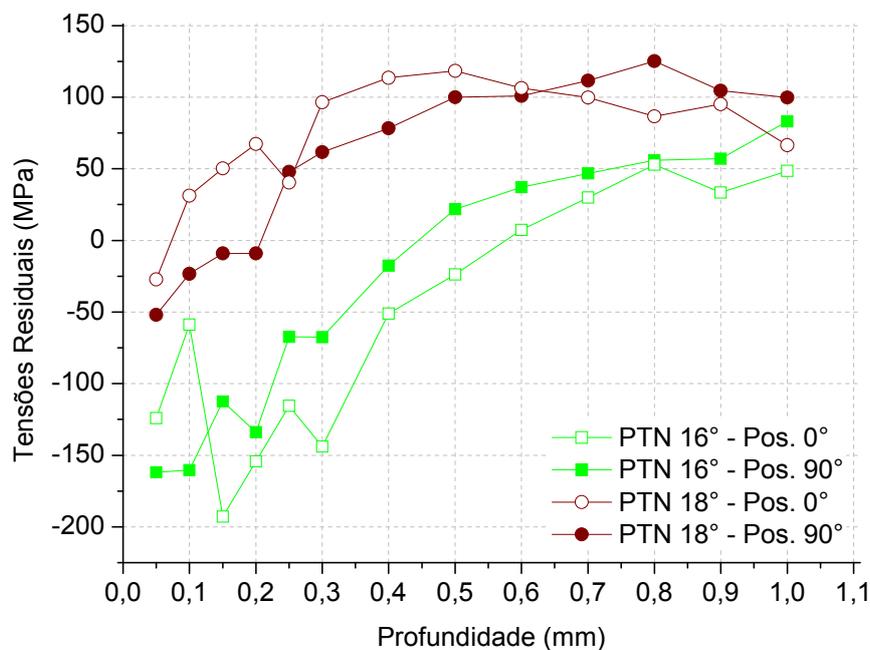


Figura 5-46 – Perfis de tensões residuais longitudinais medidos por hole-drilling para as etapas polimento e endireitamento por rolos cruzados com ângulos de 16° e 18°, orientação em relação ao maquinário 0° e 90°, Cond. I-A e I-B.

Na Figura 5-47 observa-se o nível de tensões residuais longitudinais em função da profundidade, apresentado nas etapas de pré-endireitamento, jateamento e trefilação medidos pelo método do furo cego e difração de raios-X, as condições de processamento do material são apresentados na Tabela 5-39.

A etapa de trefilação induz tensões residuais trativas e este comportamento mantendo um nível próximo de 200MPa com o aumento da profundidade até 1mm. Este comportamento foi observado pelas duas técnicas

de medição, porém para a técnica de hole-drilling foi necessária a substituição da fresa para uma de menor diâmetro, como comentado nas seções anteriores deste trabalho. Os resultados apresentados nas técnicas de difração de raios-X e hole-drilling são idênticos, da mesma forma que os apresentados na etapa de jateamento.

No polimento e endireitamento por rolos cruzados (PTN), as tensões trativas superficiais impostas pela trefilação são superadas pelas tensões aplicadas no PTN e tornam-se compressivas novamente na superfície. Os resultados observados nas técnicas de hole-drilling e difração de raios-X são similares em termos de comportamento e níveis de tensões.

Tabela 5-39 – Parâmetros de processamento do material, Figura 5-47.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de feira	Ângulo de PTN
Jateamento	Cond. I-A	Normal	-	-
Trefilação	Cond. I-A	Normal	20°	-
PTN	Cond. I-A	Normal	20°	16°

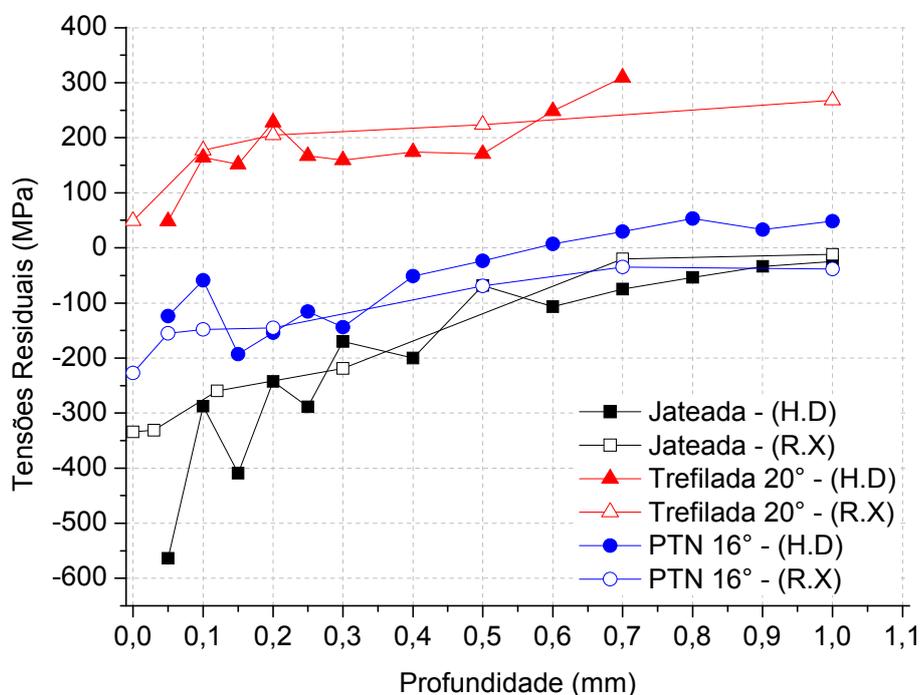


Figura 5-47 – Perfis de tensões residuais longitudinais medidos pelo método de hole-drilling e difração de raios-X para as diferentes etapas de processamento medidas referentes a posição periférica 0° – Condição de processamento I. (H.D) – Hole-drilling, (R.X) – Difração de raios-X, Cond. I-A.

Na Figura 5-48 são apresentados os valores de tensões residuais longitudinais para as etapas de trefilação 20° e PTN 16° em função da profundidade utilizando o método de difração de raios-X, os parâmetros utilizados no processo são mostrados na Tabela 5-40. A barra trefilada apresenta tensões trativas na superfície mantendo este comportamento até profundidades superiores a 2,0mm. Após esta profundidade o comportamento das tensões tende a ser mais compressivo até chegar a zero em uma profundidade que não pode ser determinada nos ensaios, em uma profundidade de 3,3mm observa-se que o comportamento passa a ser compressivo.

Na barra após o polimento e endireitamento por rolos cruzados PTN 16° observa-se o alto nível de tensões compressivas na superfície da barra, este induzido pelo processo de polimento. Este comportamento de tensões compressivas segue até uma profundidade de 1,0mm, após esta profundidade as tensões residuais tendem ser levemente trativas (próximas a zero) mantendo este comportamento até a profundidade analisada (3,3mm).

Tabela 5-40 – Parâmetros de processamento do material, Figura 5-48.

Etapa do processo	Condição de processamento do material	Pressão no Pré-endireitamento vertical	Ângulo de fieira	Ângulo de PTN
Trefilação	Cond. I-A	Normal	20°	-
PTN	Cond. I-A	Normal	20°	16°

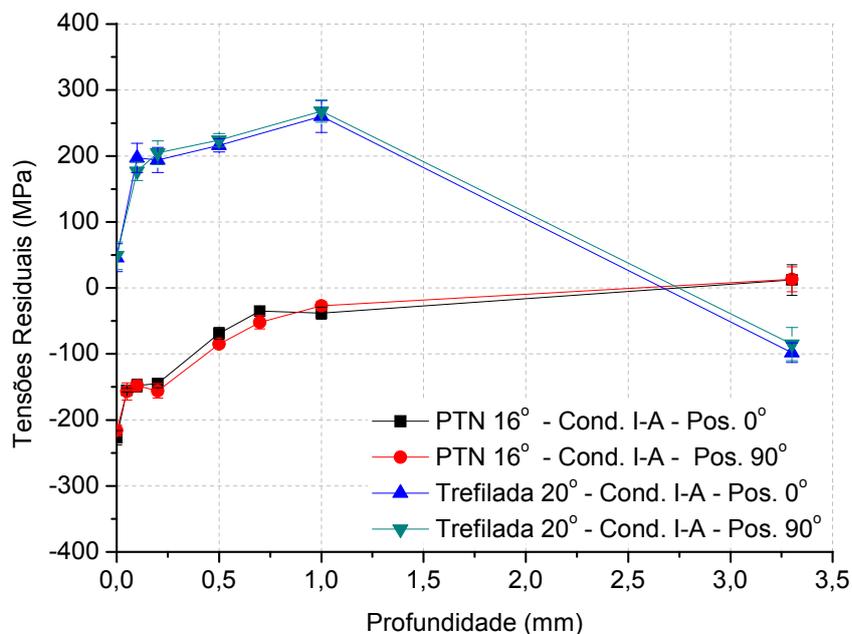


Figura 5-48 – Perfis de tensões residuais longitudinais medidas pelo método de difração de raios-X para a barra trefilada 20° e PTN 16°. Cond. I-A

5.8 Discussão Geral.

Com este trabalho foi possível obter uma visão global com respeito ao comportamento do material a cada etapa de processamento na trefilação combinada, no que tange a distribuição de tensões residuais superficiais.

Nos resultados obtidos fica evidente a contribuição de cada etapa do processo no nível final de tensões residuais. A cada etapa de processamento o material vai acumulando um "potencial de distorção" devido a não homogeneidade no nível de tensões residuais.

No pré-endireitamento o comportamento das tensões residuais pode variar de compressivo a trativo, dependendo da posição periférica do fio-máquina. Este comportamento é inerente aos processos de endireitamento, podendo-se minimizar estes efeitos utilizando-se uma posição adequada dos rolos de pré-endireitamento.

No jateamento as tensões residuais sempre apresentam-se compressivas na superfície independente da condição de processamento do material.

Na etapa de trefilação, as tensões residuais apresentam-se trativas em todas as condições de processamento estudadas neste trabalho. Utilizando-se um ângulo maior de fieira, por exemplo, 20° as tensões residuais após uma profundidade de 0,05mm até 1mm apresentam níveis maiores se comparadas com as tensões residuais

A partir dos resultados obtidos nos ensaios observou-se que com a condição padrão de geometria da fieira (20°), tensões trativas são geradas após trefilação. Independentemente do empenamento após a saída da trefilação, tensões trativas não são desejáveis, pois levam a um aumento na possibilidade de surgimento de defeitos superficiais e interferem negativamente nas propriedades mecânicas. Além disso, quanto maiores às tensões trativas após trefilação, maior deverá ser a pressão aplicada no polimento e endireitamento (PTN) posterior, o que também não é desejável, pois o alívio destas tensões em processos de usinagem (remoção de material) ou tratamentos térmicos tende a gerar empenamento. Nas diversas condições de processamento do material analisadas, obteve-se um nível diferente de tensões residuais no produto final. Utilizando a condição de processamento onde o ângulo de fieira é de 15° e um ângulo de polimento e endireitamento por rolos cruzados de 18°, obtiveram-se níveis de tensões residuais compressivos na superfície da barra, bem como uma homogeneidade ao longo do perímetro da barra.

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados concluí-se que o caminho para a otimização do processo incluiria duas etapas, uma reduzir as tensões trativas após trefilação ao mínimo possível (otimização do ângulo de ferramenta), utilizando menores ângulos e minimizando as pressões dos rolos de endireitamento e polimento PTN.

Fatores relevantes observados a partir dos resultados obtidos são:

- A realização de ensaios com a marcação da orientação em relação ao maquinário foi fundamental no entendimento do processo, o que permitiu identificar alterações nas tensões residuais na periferia das barras.
- O jateamento com granalhas não elimina todos os efeitos do pré-endireitamento, mantendo-os presentes na barra.
- O ângulo de polimento e endireitamento por rolos cruzados exerce papel fundamental no comportamento e no nível de tensões residuais do produto final, porém este ângulo utilizado depende do ângulo de fieira e assim uma otimização passa pela melhoria do ângulo de fieira em conjunto com o ângulo de polimento e endireitamento por rolos cruzados.
- A medição de tensões residuais pelo método de hole-drilling para tensões trativas (barras trefiladas) apresenta distorções se forem utilizados os métodos convencionais, para haver coerência nos resultados há necessidade da utilização de uma fresa de diâmetro inferior ao convencional.
- As medições pelo método de hole-drilling da superfície curva da barra não apresentaram problemas significativos nos resultados, visto a concordância com os resultados obtidos via difração de raios-X.
- A combinação de ângulos de fieira e polimento e endireitamento por rolos cruzados mais favoráveis em todos os ensaios realizados foi a utilização do ângulo de fieira de 15° em conjunto com o ângulo de polimento e endireitamento por rolos cruzados 18°, pois este conjunto de ângulos induziu tensões residuais compressivas na superfície e com maior homogeneidade em relação a posição periférica da barra, representando desta forma um menor potencial de distorção.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudo da última amostragem via difração de raios-X para consolidar os resultados.
- Estudo mais detalhado da influência do diâmetro do furo nas medições via hole-drilling para as barras trefiladas e propor uma explicação matemática para este comportamento.
- Realização de perfis de tensões residuais utilizando a técnica de difração de Nêutrons, obtendo assim um perfil até o núcleo do material.
- Verificação do erro de forma do fio-máquina e se este exerce alguma influência na variação das distorções apresentadas pelas barras.
- Estudo da posição dos rolos de pré-endireitamento e possível otimização via simulação computacional, ou ainda, utilizando programação por algoritmos genéticos.
- Otimização do ângulo de fieira utilizando a simulação computacional.
- Estudo da posição e pressão dos rolos de polimento e endireitamento final (PTN) e a influência do rolo côncavo e do rolo convexo nas tensões residuais finais.
- Execução de ensaios de aquecimento e resfriamento controlado em um forno para a verificação do potencial de distorção das barras e ensaios de slitting no produto final.
- Estudar as deformações impostas durante a trefilação, para que haja um entendimento da profundidade destas deformações bem como a variação de penetração destas deformações em relação ao ângulo de fieira utilizado.
- Estudo das condições tribológicas da fieira e sua relação com as tensões residuais superficiais das barras.
- Estudo de revestimentos na fieira com o objetivo de se aumentar a vida útil da ferramenta e diminuir o atrito entre a fieira e o fio-máquina.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Lu, J. "**Handbook of Measurement of Residual Stresses**". SEM, Inc. 1996, p-1.
- [2] Lodini, A. "**Analysis of Residual Stress by Diffraction using Neutron and Synchrotron Radiation**". Taylor & Francis, 2003, p-48.
- [3] Lu, J. "**Prestress Engineering of Structural Material: A Global Design Approach to the Residual Stress problem**". Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. ASM International, Ohio, 2002, p11.
- [4] Dieter, G. E. "**Metalurgia Mecânica**". Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1986, p-494.
- [5] Dieter, G. E. "**Metalurgia Mecânica**". Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1986, p-367.
- [6] Lu J.; "**Prestress Engineering of Structural Material: A Global Design Approach to the Residual Stress problem**". Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. ASM International, Ohio, 2002, p14.
- [7] Burakowski, T.; "**Surface Engineering of Metals, principles, equipment, technologies**". CRC Press 1999, p-84.
- [8] Noyan, I.C.; Cohen, J.B. "**Residual Stress - Measurement by Diffraction and Interpretation**". New York: Springer-Verlag, 1987, p-276.
- [9] Bhadeshia, H. K. D. H. "**Material factors**". Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. ASM International, Ohio, 2002, p-3.
- [10] Lu, J. "**Prestress Engineering of Structural Material: A Global Design Approach to the Residual Stress problem**". Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. ASM International, Ohio, 2002, p-14.
- [11] Lu, J. "**Prestress Engineering of Structural Material: A Global Design Approach to the Residual Stress problem**". Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. ASM International, Ohio, 2002, p-14.
- [12] Christian, J.W.; Zackay, V.F.; Aaronson H.I.; "**Decomposition of Austenite by Diffusional Processes**", Ed., Interscience, 1962, p371-386.
- [13] Wang, Z. "**Residual Stress in the forming of Materials**". ASM Handbook of residual stress and deformation of steel, ASM International, Ohio, 2002, p141.
- [14] Nakagiri, A.; Yamano, T.; Konaka, M.; Yoshida, K.; Asakawa, M.; "**Wire and Cable Technology Symposium**" 2000(June): p-75.

- [15] Godfrey, H. J.; et al; "**The benefits of using wiredrawing dies with smaller included angles and longer nibs**". Wire Journal International v. 33 no. 6 (June 2000) p. 102-13
- [16] Macherauch, E.; Kloss K. H.; "**Proceedings of the International Conference on residual Stresses**", Garmisch-Partenkirchen, FRG, 1986, pp. 167-174.
- [17] Hutchings, M. T.; Withers, P. J.; Holden, T. M.; Lorentzen, T.; "**Introduction to the Characterization of Residual Stress by Neutron Diffraction**". CRC Press, 2005, p-12.
- [18] Hutchings, M. T.; Withers, P. J.; Holden, T. M.; Lorentzen, T.; "**Introduction to the Characterization Of Residual Stress By Neutron Diffraction**". CRC Press, 2005, p-13.
- [19] Hutchings, M. T.; Withers, P. J.; Holden, T. M.; Lorentzen, T.; "**Introduction to the Characterization Of Residual Stress By Neutron Diffraction**". CRC Press, 2005, p-16.
- [20] Hutchings, M. T.; Withers, P. J.; Holden, T. M.; Lorentzen, T.; "**Introduction to the Characterization Of Residual Stress By Neutron Diffraction**". CRC Press, 2005, p-14.
- [21] Fitzpatrick, M. E.; Lodini, A.; "**Analysis of Residual Stress by Diffraction using Neutron and Synchrotron Radiation**". 2003 Taylor & Francis, p-44.
- [22] Fitzpatrick, M. E.; Lodini A.; "**Analysis of Residual Stress by Diffraction using Neutron and Synchrotron Radiation**". 2003 Taylor & Francis, p-45.
- [23] Zoch, H. W.; "**From Single Production Step to Entire Process Chain – the Global Approach of Distortion Engineering**". Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 2006, 37, No. 1. p6-10.
- [24] Zoch, H. W.; "**From Single Production Step to Entire Process Chain – the Global Approach of Distortion Engineering**". Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 2006, 37, No. 1. p6-10.
- [25] Rodrigues, J. E.; Martins, P. "**Tecnologia Mecânica – Tecnologia da Deformação Plástica, vol. II – Aplicações Industriais**". Escolar Editora. 2005, p-335.
- [26] Paech, M.; "**Factors relating to the wire straightening process and peripherals**". Wire Journal International 35 nº12, 2002 p64-68.
- [27] Rodrigues, J. E.; Martins, P.; "**Tecnologia Mecânica – Tecnologia da Deformação Plástica, vol. II – Aplicações Industriais**". Escolar Editora. 2005, p-345.
- [28] Fitzpatrick, M. E.; Lodini, A.; "**Analysis of Residual Stress by Diffraction using Neutron and Synchrotron Radiation**". 2003 Taylor & Francis, p253.
- [29] Tange, A.; Ando, K.; "**Study on shot peening processes of coil springs**", Proc. 6th Int. Conf. on Residual Stresses, Oxford, UK, 2000, p897–904.
- [30] Townsend, D. P.; Zaretsky, V.; "**Effect of shot peening on the surface fatigue life of carburized and hardened AISI 9310 spur gears**", NASA Technical Paper 2047, 1982.

- [31] Fitzpatrick, M. E.; Lodini, A.; "**Analysis of Residual Stress by Diffraction using Neutron and Synchrotron Radiation**". 2003 Taylor & Francis, p-253.
- [32] Murphy, M.; "**Blasting and shot peening**", Metal Finishing, Volume 95, Issue 2, February 1997, P-16.
- [33] Dieter, G. E.; "**Metalurgia Mecânica**". Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1986, p-561
- [34] Dieter, G. E.; Howard A. K.; Semiatin S. L.; "**Handbook of Workability and Process Design**". ASM International, Ohio, 2003, p-278.
- [35] Lange, L.; "**Handbook of Metal Forming**". McGraw-Hill Book Co. GmbH, 1986, p-14.2
- [36] Altan, T.; "**Conformação de Metais – fundamentos e aplicações**". USP, 1999, p-290.
- [37] Kachanov, L. M.; "**Foundations of theory of Plasticity**". Elsevier, New York, 1971 p245.
- [38] Mang, T.; Dresel W.; "**Lubricants and Lubrication**", WILEY-VCH GmbH, Weinheim, 2007, p-576.
- [39] Siebel, E.; Panknin W.; "**Ziehverfahren der Blechverarbeitung**", Zeitschrift für Metallkunde 1956, 47 p207–212.
- [40] Lange, K.; "**Handbook of Metal Forming**". Society of Manufacturing Engineers. GmbH, 2006, p13.24.
- [41] Schaeffer, L.; "**Conformação Mecânica**". Imprensa Livre. Porto Alegre, 1999, p-60.
- [42] Wistreich, J.; "**The fundamentals of wire drawing**", Met. Rev. 3 (1958), pp. 97–142.
- [43] Wang, Z.; "**Residual Stress in the forming of Materials**". Handbook of residual stress and deformation of steel, ASM International, Ohio, 2002, p143.
- [44] Akikazu, N.; Takaaki, Y.; Masazumi, K.; Motoo, A.; Wataru, S.; "**Behavior of residual stress and drawing stress in conical-type die and circle-type die drawing by FEM simulation and experiment**". Wire Journal International, August, 2001. p72.
- [45] Elices, M.; "**Influence of residual stresses in the performance of cold-drawn pearlitic wires**". Journal of Materials Science 39 (2004) p3889 – 3899.
- [46] Dieter, G. E.; Kuhn H. A.; "**Handbook of Workability and Process Design**", ASM International, Parks Ohio 2003. p280.
- [47] Dieter, G. E.; "**Metalurgia Mecânica**". Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1986, p-571
- [48] Atienza, J. M.; Elices M.; "**Influence of residual stresses in the tensile test of cold drawn wires**". Materials and Structures, 2003; p-548.
- [49] Atienza, J. M.; Elices M.; "**Influence of residual stresses in the stress relaxation of cold drawn wires**". Materials and Structures. Volume 37, Number 5 - June, 2004; p301-304

- [50] Wang, Z.; "**Residual Stress in the forming of Materials**". Handbook of residual stress and deformation of steel. ASM International, Ohio, 2002, p145.
- [51] Rivolta, B.; Silva, G.; Rota, M.; Cusolito, M.; "**Drawn bars: influence of straightening conditions**". Wire Journal International 37 n°5 May 2004. p77-81
- [52] Lu, J.; "**Handbook of Measurement of Residual Stresses**". SEM, Inc. 1996, p-4.
- [53] Kandil, F. A.; Lord, J. D.; "**NPL Report MATC(A)04. A Review of residual Stress Measurement Methods – a Guide to Technique Selection**", Feb 2001.
- [54] Grant, P. V.; Lord, J. D.; Whitehead P. S.; "**Measurement Good Practice Guide No. 53**", National Physical Laboratory, p-19.
- [55] Grant, P. V.; Lord, J. D.; Whitehead P. S.; "**Measurement Good Practice Guide No. 53**", National Physical Laboratory, Stresscraft Ltd. 2002, p-20.
- [56] Instruction Bulletin B-129-7, "**Surface Preparation for Strain Gauge Bonding**", Vishay Measurements Group, 1999
- [57] Grant, P. V.; Lord, J. D.; Whitehead, P.S.; "**Measurement Good Practice Guide No. 53**", National Physical Laboratory, Stresscraft Ltd. 2002, p-40.
- [58] Grant, P. V.; Lord, J. D.; Whitehead, P.S.; "**Measurement Good Practice Guide No. 53**", National Physical Laboratory, Stresscraft Ltd. 2002, p-27.
- [59] Kockelmann, H. E.; Schwarz, T.; "**Die Bohrlochmethode–ein für viele Anwendungsbereiche optimales Verfahren zur experimentellen Ermittlung von Eigenspannungen**". MTB von HBM, 29(2):33–38
- [60] Fitzpatrick, M.E.; Fry, A.T.; "**Measurement Good Practice Guide No. 52**", Determination of Residual Stresses by X-ray Diffraction – Issue 2. UK, 2005, p-5.
- [61] Lodini, A.; "**Analysis of Residual Stress by Diffraction using Neutron and Synchrotron Radiation**". 2003 Taylor & Francis, p-33.
- [62] Lodini, A.; "**Analysis of Residual Stress by Diffraction using Neutron and Synchrotron Radiation**". 2003 Taylor & Francis, p-19.
- [63] Prevéy, P. S.; "**X-ray Diffraction Residual Stress techniques**". ASM Metals Handbook, ASM International, Ohio, 1986, p. 380–392.
- [64] Hauk, V., "**Structural and Residual Stress Analysis by Non-destructive Methods**". Elsevier, 1997, p530.
- [65] Lu, J.; "**Handbook of Measurement of Residual Stresses**". SEM, Inc. 1996, p75-82.

- [66] Prevéy, P. S.; "**X-ray Diffraction Residual Stress techniques**". ASM Metals Handbook Vol. 10, ASM International, Ohio, 1986, p. 380-392.
- [67] Hauk, V.; "**Structural and Residual Stress Analysis by Non-destructive Methods**". Elsevier, 1997, p522-563.
- [68] Lu, J.; "**Handbook of Measurement of Residual Stresses**". SEM, Inc. 1996, p-88.
- [69] Prevéy, P. S.; "**X-ray Diffraction Residual Stress techniques**". ASM Metals Handbook, ASM International, Ohio, 1986, p. 380-392.
- [70] Moore, M.G.; Evans W.P.; "**Mathematical correction for stress in removed layers in X-ray diffraction residual stress analysis**". SAE Trans. 66 (1958), p340-345.
- [71] Moore, M.G.; Evans, W.P.; "**Mathematical correction for stress in removed layers in X-ray diffraction residual stress analysis**". SAE Trans. 66 (1958), p344.
- [72] Moore, M.G.; Evans, W.P.; "**Mathematical correction for stress in removed layers in X-ray diffraction residual stress analysis**". SAE Trans. 66 (1958), p340-345.
- [73] Prevéy, P.S.; "**A Method of Determining Elastic Constants in Selected Crystallographic Directions for X-Ray Diffraction Residual Stress Measurement**", Adv. in X-Ray Analysis, Vol. 20, 1977, p345-354.
- [74] Walton, H.W.; "**Deflection Methods Chapter**", Handbook of Measurement of Residual Stress, G. E. Totten, 2002 pg. 89-98.
- [75] Metz, M.; Santos, C.; Rocha, A.; "**Análise Qualitativa Das Tensões Residuais Longitudinais Em Barras Trefiladas De Aço Sae 1045 Através Do Método Slliting**". 8  Congresso Iberoamericano De Engenharia Mecânica. Cusco, 2007. p-1213.
- [76] Klein, D.; Thoben, K.-D.; Nowag, L.; "**Using Indicators to Describe Distortion Along a Process Chain**". Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 2006, 37, No. 1. p 19-22.
- [77] ASTM E-837, "**Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method**"; Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01. ASTM International, 2002.
- [78] "**www.vishay.com**" acesso em janeiro de 2008.
- [79] Kennedy, D.M.; Vahey, J.; Hanney, D.; "**Micro shot blasting of machine tools for improving surface finish and reducing cutting forces in manufacturing**". Materials and Design 26 (2005) p203-208.
- [80] Hampton, R. W.; Nelson, D. V.; "**Comparison Of Residual Stress Measurements In Welded Thin Plates By X-Ray And Hole Drilling Methods**". ASME, NDE - Vol. 5, Non destructive Evaluation. 1989. p171-176.

- [81] Yoshihisa, E.; Kitsunai, Y.; Maeda, Y.; "**Residual Stress Measurements of welded plates by X-ray and hole drilling methods**". Residual Stresses III: Science and Technology. Taylor & Francis, 1992. p979-984.
- [82] Hampton, R. W.; Nelson, D. V.; "**Comparison Of Residual Stress Measurements In Welded Thin Plates By X-Ray And Hole Drilling Methods**". ASME, NDE - Vol. 5, Non destructive Evaluation. 1989. p171-176.
- [83] Grant, P. V.; Lord, J.D.; Whitehead, P.S.; "**Measurement Good Practice Guide No. 53**". National Physical Laboratory, Stresscraft Ltd. 2002, p-13.
- [84] Instruction Bulletin B-129-7, "**Surface Preparation for Strain Gauge Bonding**". Vishay Measurements Group, 1999
- [85] Akikazu, N.; Takaaki Y.; Masazumi, K.; Motoo, A.; Wataru, S.; "**Behavior of residual stress and drawing stress in conical-type die and circle-type die drawing by FEM simulation and experiment**". Wire Journal International, August, 2001. p-72.
- [86] Atienza, JM, Elices, M. "**Influence of residual stresses in the stress relaxation of cold drawn wires**". Materials and Structures. Volume 37, Number 5 - June, 2004; p301-304
- [87] Wang, Z.; "**Residual Stress in the forming of Materials**". Handbook of residual stress and deformation of steel. ASM International, Ohio, 2002, p141.
- [88] Wu, B. J.; Chan, L.C.; Lee, T.C.; Ao, L.W.; "**A study on the precision modeling of the bars produced in two cross-roll straightening**". Journal of Materials Processing Technology 99, 2000, p202-206.
- [89] Yu, X.X., Lau, W.S.; "**A finite-element analysis of residual stress in stretch grinding**". Journal of Materials Processing Technology 94, 1999, p13-22.
- [90] Mohamed, N. A.; Nasr, E. G.; Ng, M.A.; "**A modified time-efficient FE approach for predicting machining-induced residual stresses**". Finite Elements in Analysis and Design 44 (2008) p149 – 161.
- [91] Hampton, R. W.; Nelson, D. V.; "**Comparison Of Residual Stress Measurements In Welded Thin Plates By X-Ray And Hole Drilling Methods**". ASME, NDE - Vol. 5, Non destructive Evaluation. 1989. p171-176.
- [92] Yoshihisa, E.; Kitsunai, Y.; Maeda, Y.; "**Residual Stress Measurements of welded plates by X-ray and hole drilling methods**". Residual Stresses III: Science and Technology. Taylor & Francis, 1992. p979-984.
- [93] Dieter, G. E.; "**Metalurgia Mecânica**". Rio de Janeiro. Guanabara Dois, 1986, p-572.

- [94] Akikazu, N.; Takaaki Y.; Masazumi K.; Motoo A.; Wataru S.; "**Behavior of residual stress and drawing stress in conical-type die and circle-type die drawing by FEM simulation and experiment**". Wire Journal International, August, 2001. p-72.
- [95] Dieter, G. E.; Kuhn H. A.; "**Handbook of Workability and Process Design**", ASM International, Parks Ohio 2003. p280
- [96] Rodrigues, J.; Martins, P.; "**Tecnologia Mecânica – Tecnologia da Deformação Plástica, vol. II – Aplicações Industriais**". Escolar Editora. 2005, p-345.
- [97] Atienza, J.; Hervias, R. J.; Martinez, P. M.; Mompean, F.; Garcia, H.M.; Elices, M.; "**Residual stresses in cold drawn pearlitic rods**". Scripta Materialia, vol 52 p1223–1228.
- [98] Atienza, J. M.; Elices, M.; "**Influence of residual stresses in the tensile test of cold drawn wires**". Materials and Structures 2003; p548.
- [99] Atienza, J. M.; Elices, M.; "**Influence of residual stresses in the stress relaxation of cold drawn wires**". Materials and Structures, Vol. 37, Number 5 - June, 2004; p301-304.
- [100] Hill, R.; "**The Mathematical Theory of Plasticity**". Oxford University Press, 1998, p-171.
- [101] Wang, Z.; "**Residual Stress in the forming of Materials**". Handbook of residual stress and deformation of steel. ASM International, Ohio, 2002, p145.
- [102] Lange, L.; "**Handbook of Metal Forming**". McGraw-Hill Book Co. GmbH, 1986, p-2.21.
- [103] Shemensky R. M.; "**Wiredrawing by computer simulation**". Wire Journal International, April, 1999. p166-183.