

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

**INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE PROCESSO NO EMPENAMENTO DE  
BARRAS TREFILADAS DO AÇO SAE 9254**

**Christian Corrêa dos Santos**

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

**INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE PROCESSO NO EMPENAMENTO DE  
BARRAS TREFILADAS DO AÇO SAE 9254**

CHRISTIAN CORRÊA DOS SANTOS  
Engenheiro de Materiais

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 Processos de Fabricação, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Rocha

Banca Examinadora:

Eng. Dr. Alberto Moreira Guerreiro Brito, Centro de Tecnologia/UFRGS  
Prof. Dr. Afonso Reguly, PPGEM/UFRGS  
PhD. Luis Augusto Colembergue Klujszo, Gerdau Aços Especiais Piratini

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann  
Coordenador do PPGEM

Trabalho dedicado a minha querida família, em especial à Luciani e Carolina.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus pelo dom da vida e presença nos momentos difíceis.

À minha família, em especial a Luciani e Carolina, por todo o carinho, ajuda, apoio e compreensão em todos os momentos.

À Gerdau Aços Especiais Piratini, representada pelos Engenheiros Rodrigo Belloc, José Alberto Cardoso e Maurício Metz, pela oportunidade de desenvolvimento profissional e capacitação técnica.

À equipe da Transformação Mecânica, em especial a célula de Trefilas da Aços Especiais Piratini pelo auxílio, sugestões e observações importantes.

Ao professor Dr. Alexandre Rocha pelo conhecimento e orientação recebida durante o trabalho.

Aos colegas da Aços Especiais Piratini, em especial aos colegas Jair Janoski e Samuel Freese pelo auxílio na execução dos ensaios e discussões.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	VIII
LISTA DE TABELAS .....	XII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS .....	XIII
RESUMO .....	XIV
ABSTRACT .....	XV
1.0 INTRODUÇÃO .....	1
2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1 Aços Mola .....	3
2.2 Processo de Fabricação de Barras de Aço Mola por Trefilação .....	6
2.2.1 Pré-Endireitamento .....	9
2.2.2 Jateamento com Granalha.....	10
2.2.3 Trefilação .....	11
2.2.4 Endireitamento com Rolo Duplo.....	17
2.3 Análise do Processo de Trefilação de Barras de Seção Circular .....	22
2.3.1 Deformação Homogênea .....	23
2.3.2 Método dos Discos.....	23
2.3.3 Trabalho Redundante .....	24
2.3.4 Solução através do Limite Superior .....	26
2.4 Relação entre Propriedades Mecânicas e Microestrutura .....	30
2.5 Origem do Empenamento .....	32
2.5.1 Empenamento .....	34
2.6 Tensões Residuais.....	35
2.6.1 Origem das Tensões Residuais .....	36
3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	37
3.1 Matéria Prima.....	37
3.2 Processo de Trefilação Combinada .....	38

3.3	Caracterização Metalúrgica.....	40
3.3.1	Análise Química .....	40
3.3.2	Ensaio de Dureza.....	40
3.3.3	Caracterização Microestrutural .....	41
3.3.4	Ensaio de Tração .....	41
3.3.5	Avaliação do Empenamento.....	42
3.4	Análise Estatística do Processo.....	43
3.4.1	Etapa 1: Planejamento.....	44
3.4.2	Etapa 2: Execução .....	50
3.4.3	Etapa 3: Avaliação .....	50
3.4.4	Etapa 4: Correções e Melhorias.....	51
4.0	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	52
4.1	Resultado do Empenamento no Processo Padrão.....	52
4.2	Microestrutura, Microinclusões, Tamanho de Grão.....	53
4.3	Dureza .....	55
4.4	Propriedades Mecânicas .....	56
4.5	Velocidade de Trefilação .....	59
4.6	Geometria da Fieira .....	60
4.7	Ângulos dos Rolos de Endireitamento .....	61
4.8	Pressão dos Rolos de Endireitamento .....	62
4.9	Influência Combinada da Fieira, Ângulo e Pressão dos Rolos de Endireitamento Empenamento .....	63
4.10	Resultado da Variabilidade do Empenamento Após Melhorias no Processo ...	65
5.0	CONCLUSÃO .....	67
6.0	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	68
7.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	69

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Aplicações do Aço Mola .....	4
Figura 2.2	Molas Utilizadas na Indústria Automotiva.....	4
Figura 2.3	Fluxo de Fabricação de Barras Trefiladas de Aço SAE 9254.....	5
Figura 2.4	Processo de Trefilação em Trefila Combinada.....	7
Figura 2.5	Efeito do Trabalho a Frio na Curva de Tensão Deformação para Barras de Baixo Carbono.....	8
Figura 2.6	Efeito da Trefilação nas Propriedades Mecânicas para Barras de Aços .....	8
Figura 2.7	Influência da Interferência dos Rolos Pré-endireitadores no Limite de Escoamento.....	10
Figura 2.8	Ilustração do Processo de Jateamento com Granalha.....	10
Figura 2.9	Definição do Perfil da Fieira e do Parâmetro $\Delta$ .....	12
Figura 2.10	Parâmetros da Geometria da Fieira que Influenciam no Processo de Trefilação .....	13
Figura 2.11	Zona de Deformação na Trefilação e Variação no Parâmetro $\Delta$ .....	14
Figura 2.12	Relação entre o Comprimento de Contato da Fieira l e o Diâmetro Inicial da Barra $h_0$ na Deformação Plástica .....	16
Figura 2.13	Influência dos Pontos de Inflexão no Fluxo do Metal Durante a Trefilação na Entrada e Saída da Fieira.....	17
Figura 2.14	Endireitamento com Dois Rolos .....	18
Figura 2.15	Forma Esquemática de uma Endireitadeira Duplo Rolos .....	19
Figura 2.16	Distância entre uma Revolução Completa.....	19
Figura 2.17	Vista Inferior dos Rolos dos Ângulos de Endireitamento.....	20
Figura 2.18	Ilustração do Termo “Plastic Ratio” Utilizado para Quantificar a Zona Deformada Plasticamente Durante Endireitamento .....	21
Figura 2.19	Detalhe da Geometria e as Tensões Envolvidas no Processo de Trefilação, de Acordo com o Método dos Discos .....	24
Figura 2.20	Esquemática da Deformação Redundante .....	25

Figura 2.21	Campo Radial de Velocidade de Avitzur .....	26
Figura 2.22	Regiões Características de Dissipação de Energia Segundo o Modelo de Avitzur.....	27
Figura 2.23	Características das Tensões Relativas de Trefilação Teórica e Experimental .....	29
Figura 2.24	Representação Gráfica das Energias Dissipadas em Função do Semi-ângulo da Fieira .....	29
Figura 2.25	Microestrutura Vista a Microscópio Eletrônico de Varredura Mostrando o Alinhamento da Perlita com o Fluxo de Trefilação.....	31
Figura 2.26	Causas do Empenamento.....	33
Figura 2.27	Relações entre Tempo, Temperatura, Tensão, Deformação e Microestrutura nos Materiais de Engenharia.....	33
Figura 2.28	Tipos de Empenamento .....	35
Figura 2.39	Medição do Empenamento.....	35
Figura 3.1	Microestrutura do Produto Laminado.....	38
Figura 3.2	Esquema do Local de Medição da Microestrutura, Tamanho de Grão e Inclusões .....	41
Figura 3.3	Máquina de Ensaio Universais .....	42
Figura 3.4	Medição do Empenamento.....	42
Figura 3.5	Variação do Empenamento em Barras Bitola 12,5 e 14,03 mm no Início do Trabalho.....	44
Figura 3.6	Processo de Trefila Combinada e Pontos de Retirada de Amostras.....	44
Figura 3.7	Histórico das Reclamações de Clientes por Motivo Empenamento.....	46
Figura 3.8	Fluxograma do Processo e Variáveis Envolvidas .....	47
Figura 3.9	Monitor de Controle da Velocidade de Trefilação .....	49
Figura 3.10	Rolos de Endireitamento .....	49
Figura 4.1	Resultado da medição do Empenamento no Processo Padrão.....	52
Figura 4.2	Microestrutura após Redução na Fieira Teste 1 .....	53

Figura 4.3	Microestrutura após Endireitamento Teste 1 .....	53
Figura 4.4	Microestrutura após Redução na Fieira Teste 5.....	53
Figura 4.5	Microestrutura após Endireitamento Teste 5 .....	53
Figura 4.6	Microestrutura após Redução na Fieira Teste 6.....	53
Figura 4.7	Microestrutura após Endireitamento Teste 7 .....	53
Figura 4.8	Microinclusões Amostra Laminado Bruto .....	54
Figura 4.9	Microinclusões após Redução na Fieira .....	54
Figura 4.10	Microinclusões após Endireitamento.....	54
Figura 4.11	Microestrutura Material Laminado Bruto .....	54
Figura 4.12	Microestrutura após Fieira.....	54
Figura 4.13	Microestrutura após Endireitamento.....	54
Figura 4.14	Variação do Empenamento em Relação à Influência da Velocidade de Trefilação, Semi-ângulo de Fieira e Ângulos dos Rolos de Endireitamento.....	58
Figura 4.15	Histograma da Variação do Empenamento em Relação à Influência da Velocidade de Trefilação, Semi-ângulo de Fieira e Ângulos dos Rolos de Endireitamento.....	58
Figura 4.16	Variação do Empenamento com Aumento da Velocidade de Trefilação .....	59
Figura 4.17	Ilustração das Tensões e Deformações no Processo de Trefilação.....	60
Figura 4.18	Variação do Empenamento Médio com o Semi-ângulo da Fieira .....	61
Figura 4.19	Histograma da Variação do Empenamento em Relação à Influência dos Ângulos dos Rolos de Endireitamento.....	62
Figura 4.20	Histograma da Variação do Empenamento em Relação à Influência da Pressão dos Rolos de Endireitamento .....	63
Figura 4.21	Histograma da Variação do Empenamento em Relação à Influência da	

Pressão dos Rolos de Endireitamento .....	63
Figura 4.22 Comparativo do Resultado da Variável Resposta Empenamento Médio para a Bitola 12,5mm .....	64
Figura 4.23 Resultado da Variável Resposta Desvio-padrão do Empenamento na Bitola 12,5 mm .....	64
Figura 4.24 Resultado da Variabilidade do Empenamento após Realização do Trabalho	65
Figura 4.25 Histograma da Variabilidade do Empenamento antes e depois do Trabalho.	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Composição Química do Aço SAE 9254.....	37
Tabela 3.2	Parâmetros de Processo Utilizados nos Experimentos .....	39
Tabela 3.3	Parâmetros de Pré-endireitamento.....	40
Tabela 3.4	Parâmetros de Processo Padrão Utilizados na Trefilação de Aço SAE 9254 ..	48
Tabela 3.5	Reduções Utilizadas no Processo de Trefilação do Aço SAE 9254 .....	48
Tabela 3.6	Matriz da Execução dos Testes .....	50
Tabela 4.1	Matriz da Execução dos Testes .....	52
Tabela 4.2	Resultado de Dureza ao Longo do Processo de Trefilação .....	55
Tabela 4.3	Matriz da Execução dos Testes .....	56
Tabela 4.4	Resultado da Variação de Dureza em Relação ao Semi-ângulo da Fieira.....	56
Tabela 4.5	Resultado da Resistência a Tração do Material ao Longo do Processo de Trefilação .....	56
Tabela 4.6	Resultado do Limite de Escoamento do Material ao Longo do Processo de Trefilação .....	57
Tabela 4.7	Resultado do Alongamento do Material ao Longo do Processo de Trefilação	57
Tabela 4.8	Matriz da Execução dos Testes .....	57
Tabela 4.9	Matriz da Execução dos Testes .....	59
Tabela 4.10	Matriz da Execução dos Testes .....	61
Tabela 4.11	Matriz da Execução dos Testes .....	62
Tabela 4.12	Matriz da Execução dos Testes .....	63
Tabela 4.13	Matriz da Execução dos Testes .....	65
Tabela 4.14	Modificações Realizadas no Processo que Levaram a Melhorias.....	65

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

$A$	ampere;
$x$	posição dos rolos endireitadores;
$x'$	interferência dos ângulos endireitadores;
$\sigma_0$	tensão de escoamento;
$\sigma_1$	tensão na direção 1;
$\sigma_2$	tensão na direção 2;
$\sigma_3$	tensão na direção 3;
$\mu$	coeficiente de atrito;
$\alpha$	semi-ângulo de entrada;
$\beta$	semi-ângulo de saída;
$l$	comprimento da zona de deformação;
$Lp$	comprimento do paralelo;
$\varepsilon_1$	deformação na direção 1;
$\varepsilon_2$	deformação na direção 2;
$\varepsilon_3$	deformação na direção 3;
$r$	raio da barra;
$V$	velocidade do rolo endireitador;
$V_x$	componente velocidade na direção x;
$V_y$	componente velocidade na direção y;
$a_0$	área inicial;
$a_1$	área final;
$d_0$	diâmetro inicial;
$d_1$	diâmetro final;
$d_m$	diâmetro médio;
$Y$	característica do produto final;
$y$	característica do produto intermediário;
$c$	variável do processo controlada;
$r$	variável do processo não controlada (ruído);

## RESUMO

Existem muitas aplicações em engenharia onde são requisitados materiais que apresentem boas propriedades mecânicas tais como, resistência mecânica, alto limite de escoamento, dureza, aliado ao atendimento às necessidades do cliente. Dentro deste contexto, foi realizado um trabalho focado em processo de trefilação combinada, utilizando como método a produção de barras a partir de rolo de fio-máquina. A trefilação combinada consiste nas etapas de pré-endireitamento com múltiplos rolos, jateamento, trefilação, corte e endireitamento com dois rolos, tendo como produto final barras acabadas trefiladas.

Este trabalho teve por objetivo otimizar o processo de trefilação de aço SAE 9254 (aço mola) visando à redução da variabilidade do empenamento, bem como atender os níveis de especificação para diversos clientes. Esta qualidade de aço é empregada na fabricação de molas de suspensão para indústria automotiva e agrícola, onde estas, com seus processos de manufatura, agregam ao produto propriedades específicas (por exemplo, dureza e resistência a tração) para o seu uso.

Inicialmente foi realizada uma revisão dos principais fundamentos e conceitos metalúrgicos referentes aos mecanismos de empenamento e endireitamento dos aços, bem como a influência de cada uma das variáveis de processo em questão nas propriedades finais do produto com foco no empenamento.

Nesta dissertação foram avaliadas as inter-relações existentes no processo de trefilação, dentre os quais velocidade de trefilação, geometria de fieira (semi-ângulo da fieira), pressão de endireitamento e ângulo de endireitamento, utilizados na trefila. Foi realizada a caracterização mecânica e metalúrgica do aço base, produto laminado e trefilado nas bitolas 12,5 mm e 14,03 mm.

Os resultados obtidos permitiram melhorar os níveis de empenamento inicialmente encontrados, fazendo mudanças nos parâmetros de processo e otimizando a trefilação desta qualidade de aço mola. Foram determinados valores limites para as variáveis críticas de processo estudadas, atendendo assim a qualidade exigida pelo cliente desde que as mesmas sejam respeitadas.

Palavras chaves: empenamento, trefilação, endireitamento, tensões.

## ABSTRACT

There are many applications in engineering in which materials with good mechanical properties are required such as, tensile strength, tension yield, toughness, together with supplying the client's needs. Focusing on this, a research was conducted focused on searching on ways on how to better the quality of the product as well as serving the client's specifications. The combined drawing process consists of pre-straightening, shot peening, drawing, cutting and two roll straightening of coils to produce bars.

The objective of this paper is to optimize the cold drawn process of steel grade SAE 9254 (spring steel) aiming the variability reduction of the straightening, as well as serve the levels of specifications for various clients. This quality of steel is used in the manufacturing of suspension springs for the automotive and agricultural industries, whereas with their manufacturing processes aggregate to the product specific properties (for example, toughness and tensile strength) for its uses.

Initially, a review of the main fundamentals and the metallurgical concepts referring to the straightening and straightening mechanisms of the steel was realized. As well as the influence of each process variable existing in the final property of the product focusing on straightness.

In this text, the existing relations in the cold drawn process were compiled, such as the speed of cold drawn, die semi-angle, the straightening pressure and angle, used in the cold drawn. The mechanical properties and metal characterization of the base steel was made, rolling product and cold drawing in the 12,5mm and 14,03mm gauges.

The obtained results allowed us to improve the initially found levels of straightening, applying changes to the process parameter and optimizing the cold drawn of the quality of this spring steel. Limit values were checked for the critical variable of process that were studied, and so attending the quality demanded by the client as long as the same are respected.

Key words: straightening, cold drawn, tension.

## 1 INTRODUÇÃO

A idéia deste trabalho surgiu da necessidade da melhoria no processo de trefilação do aço SAE 9254, bem como compreensão e detalhamento da influência dos parâmetros de trefilação (velocidade, semi-ângulo de fieira, pressão e ângulos de endireitamento) no empenamento de barras deste aço.

Dentro deste contexto, foi proposto um trabalho conjunto com determinado cliente, do segmento de molas automotivas, que estava enfrentando problemas de variabilidade no empenamento de barras trefiladas recebidas do fornecedor. Com a utilização de método estatístico, buscou-se minimizar a variabilidade do empenamento de barras trefiladas e reduzir assim as reclamações do cliente. Neste trabalho, estuda-se o processo de trefilação combinada, utilizado como método de produção de barras de aço a partir de rolos de fio-máquina. No seu processo interno, o cliente recebia barras empenadas que não podiam ser montadas na matriz (ferramenta) para elaboração das molas.

Desde o começo do século XXI, o movimento pela qualidade vem crescendo em expressão no mundo inteiro. Inicialmente limitado ao âmbito de algumas empresas industriais nos países do Primeiro Mundo, o movimento alastrou-se cada vez mais, principalmente no período que se seguiu ao término da Segunda Guerra Mundial (PAESE, 2000).

O movimento consolidou-se basicamente a partir dos anos 1970, com os indiscutíveis êxitos econômicos alcançados pelo Japão e pelos países do Sudeste da Ásia, não havendo hoje país do mundo que não tenha sido contaminado pelos conceitos da Qualidade Total, Produtividade e Competitividade. Aliado a este movimento, as empresas metal-mecânicas necessitam ser dinâmicas a fim de se tornarem competitivas e garantirem sua sobrevivência.

A aplicação de Controle de Qualidade, Programação da Produção e Tecnologias de Processo é uma realidade nos países desenvolvidos. É consequência do efeito da globalização dos mercados. A implementação da qualidade não é mais considerada vantagem competitiva, mas condição mínima para que clientes e fornecedores possam manter relações contratuais baseadas na confiança. As empresas que ainda não acordaram para estas evidências podem ter problemas de mercado em um futuro próximo, tendo em vista não conseguirem acompanhar a linguagem e as exigências do mercado comprador.

É sabido que o processo de trefilação modifica o estado de tensões residuais presentes em um componente mecânico. Quando o componente passa de um processo ao outro ao longo de uma rota de fabricação, as tensões são rearranjadas e um novo estado de tensões é gerado. Esta alteração vem causar distorções no material, sendo uma delas o empenamento. Para minimizar o empenamento, melhorias no processo podem ser obtidas pela experimentação e otimização do processo. Além disto, as empresas investem em soluções como tratamento térmico e/ou mesmo endireitamento do material gerando assim custo ao processo e possível atraso na entrega do material ao cliente. Convém citar que outras causas do empenamento são heterogeneidades na composição química, distribuição de inclusões, deformações heterogêneas, entre outras que não foram o foco do trabalho.

A fim de evitar aumento de custo com a introdução de outro processo na etapa de fabricação de barras trefiladas para o cliente, foi elaborado este trabalho de análise da influência de parâmetros do processo de trefilação.

Frente a tal cenário, foi realizada a caracterização do aço SAE 9254 empregado para molas de suspensão na indústria automotiva, através de ensaios metalúrgicos e mecânicos. Além disto, relacionaram-se as possíveis causas e efeitos de alterações no processo de trefilação do aço que poderiam vir a afetar a operacionalidade da máquina ou qualidade do produto.

Adicionalmente, realizaram-se testes na planta visando caracterizar e quantificar os fenômenos presentes durante o processo de trefilação que poderiam influenciar no empenamento. O desempenho de diversas barras foi acompanhado em diferentes condições de contorno a fim de caracterizar as influências das mesmas na característica de qualidade empenamento.

Para determinar a significância de cada parâmetro e de suas interações foi utilizado o aplicativo computacional estatístico Mini Tab, com projeto fatorial cruzado a 2 fatores e 2 níveis para cada fator.

Finalmente, com os resultados obtidos, otimizou-se e padronizou-se os parâmetros de trefilação para esta qualidade de aço com o intuito de estabilizar a variabilidade do processo e minimizar o empenamento das barras, atendendo assim os requisitos do cliente.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Aços Mola

Em inúmeras máquinas e motores é necessário empregar molas que trabalham elasticamente absorvendo esforços e armazenando energia durante certo tempo para devolver depois. O fundamento do funcionamento das molas baseia-se na propriedade que alguns materiais possuem, entre eles o aço, de poder sofrer importantes deformações elásticas quando submetidas a esforços, onde estas deformações desaparecem logo que cessa o esforço. Uma das principais características que um material deve ter para isto ocorrer é um elevado limite elástico, e isto os aços molas possuem (MAKER, 2002; BARREIRO, 1978; SHIN, 1999). No trabalho em questão, irá se tratar de molas automotivas. Isto porque o trabalho foi desenvolvido juntamente com um cliente moleiro cuja principal reclamação era o recebimento da matéria prima (barras de aço trefiladas) empenada.

Os aços de mesma composição química podem ter seu desempenho diferenciado devido a processos mecânicos e metalúrgicos pelos quais podem passar. Estes processos alteram as propriedades mecânicas e metalúrgicas do aço, proporcionando-o melhores condições e aplicabilidade. Uma das características importantes que se busca com estes processos é o aumento da resistência a fadiga do material. Esta propriedade pode ser aumentada tendo-se uma boa qualidade superficial da barra (MAKER, 2002), além da microestrutura e resistência a tração contribuir também para o mesmo (SHIN, 1999).

Os aços mola podem ser encontrados em quatro famílias: aço para molas de compressão, aço para molas de extensão, aço para molas de torção e aço mola na forma de fio máquina. A Figura 2.1 mostra alguns tipos e aplicações do aço mola.

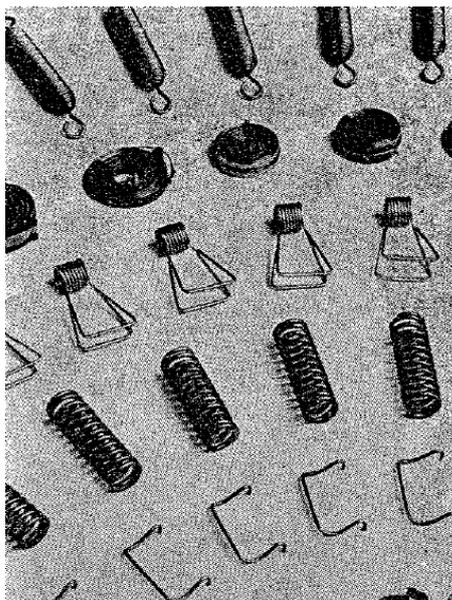


Fig. 2.1 – Aplicações do aço mola (BARREIRO, 1978)

Dentro de cada família existem outros tipos de aço mola como, por exemplo: aço para molas de compressão e aço para molas chato. Isto depende dos processos mecânicos e metalúrgicos que sofrem e sua aplicabilidade.

Uma das classes de molas é conhecida como molas helicoidais. Estas constituem um dos principais elementos elásticos na suspensão dos veículos, onde em conjunto com elementos estruturais e controladores de frequência tem como objetivo proporcionar conforto e estabilidade, mantendo a dirigibilidade do veículo. Elas trabalham sob esforço de flexo-torção, onde o esforço de torção é predominante e acrescido de componente de flexão.

Os materiais aplicados na confecção das molas helicoidais são aços-liga. No contexto geral, as características mais importantes desta qualidade de aço são: resistência à tração, dureza e resistência a fadiga (SHIN, 1999). Exemplos de molas helicoidais são mostrados na figura 2.2.



Fig. 2.2 – Molas utilizadas na indústria automotiva



pelo molde e controle de velocidades, temperatura e taxa de resfriamento do aço. Na Laminação, após o processo de reaquecimento pelos fornos, o material é conformado a quente através da passagem por rolos em uma extensa seqüência passando da seção quadrada para redonda e, finalmente para a condição de fio-máquina.

## 2.2 Processo de Fabricação de Barras de Aço Mola por Trefilação

O processo de fabricação de barras a partir de bobinas de aço é amplamente utilizado em indústrias de transformação em função da alta produtividade possibilitada por este. Além dos ganhos relacionados ao processo de laminação a quente de bobinas, a utilização destas na conformação a frio possibilita uma logística mais ágil e uma taxa de produção mais elevada do que a produção de materiais trefilados utilizando barras com matéria prima. Em contrapartida, o processo de trefilação passa a envolver etapas importantes de endireitamento nas quais é ultrapassado o limite de escoamento do material, levando obviamente a uma mudança no estado de tensões deste (METZ, 2007).

Atualmente, mesmo que este conceito ainda não tenha sido muito difundido, a trefilação de peças especiais é corriqueiramente usada para automóveis, máquinas de engenharia, implementos farmacêuticos, ferramentas, equipamentos industriais e maquinário têxtil.

Há uma série de variáveis e fatores a serem considerados antes de decidir se o processo de trefilação deve ser utilizado. Muitos levam em consideração o *design* da peça a ser produzida e o volume de produção. Mas se tratando do processo de manufatura, deve-se levar em consideração o número de operações secundárias ao qual a peça deverá ser submetida para chegar até o produto final. Isto porque quanto maior o número de operações maior o custo do processo e qualidade envolvidos. Atualmente as máquinas modernas seguem um fluxo de produção em linha, em máquinas chamadas trefilas combinadas, realizando em seqüência diferentes operações: desbobinamento, pré-endireitamento, jateamento, trefila, corte e endireitamento / polimento (NAKAGIRI, 2001). A figura 2.4 mostra de forma esquemática um exemplo típico de uma máquina de trefila combinada.

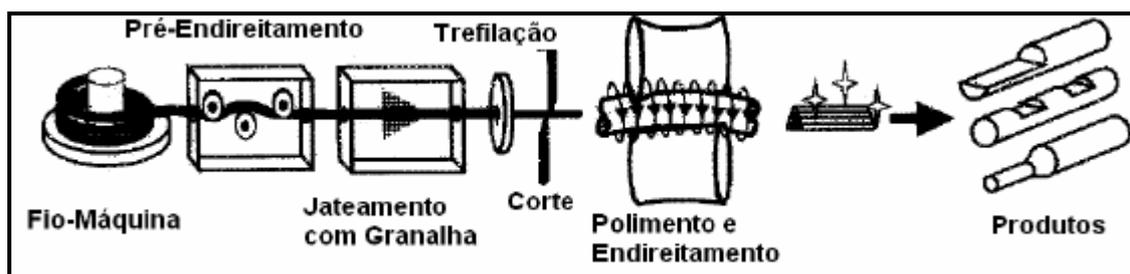


Fig. 2.4 – Processo de trefilação em trefila combinada (NAKAGIRI, 2001)

Para se obter o produto final para o cliente, parte-se da matéria prima básica: o aço (no estado de rolos de fio-máquina) e seguem os estágios de corte, pré-forma, forma e acabamento. São máquinas robustas, muitas com dedicação exclusiva devido à complexidade final da peça. Cabe salientar que as diversas melhorias existentes nos processos visam a redução de custo e aumento da produtividade. As diversas melhorias propostas, caso não sejam bem otimizadas, podem acarretar problemas de qualidade no material devido a características intrínsecas de cada projeto de produto. Do ponto de vista de processo, uma dessas alterações pode ser a eliminação do tratamento térmico, muito utilizado após a trefilação, para redução da tensão residual. Esta eliminação ocorreria caso o processo de trefilação garantisse um tensionamento residual do material dentro das condições especificadas pelo cliente. Caso isto ocorra, as propriedades mecânicas do material, como por exemplo, dureza, entre outras, podem ser afetadas.

O processo de trefilação tem como característica aumentar a resistência a tração e tensão de escoamento do material, isto devido ao trabalho (deformação) a frio que o material sofre. A figura 2.5 mostra a variação da curva tensão versus deformação em relação ao trabalho a frio (trefilação) aplicado. Também se podem relacionar as variações nas propriedades mecânicas do material a trefilação como pode ser observado na figura 2.6, onde há um aumento da resistência a tração e escoamento do material e, em contrapartida, uma redução na estricção e alongamento (BOYER, 2002; NEWBURY, 2004; MACKENZIE, 1980).

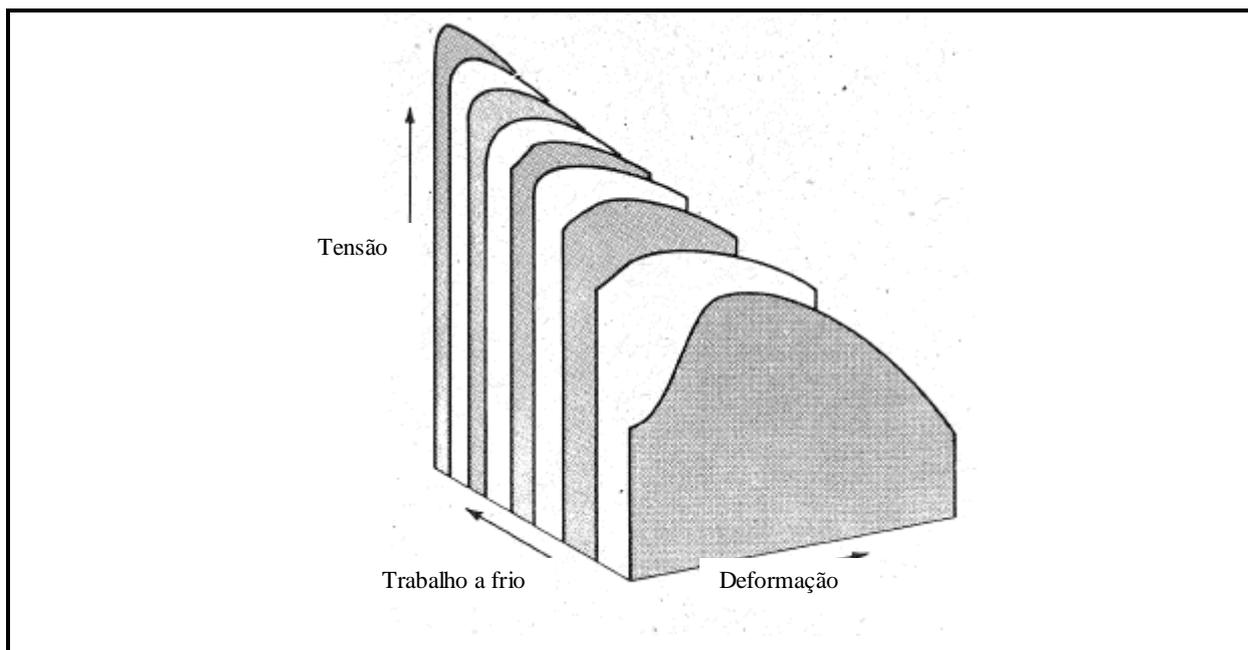


Fig. 2.5 – Efeito do trabalho a frio na curva de tensão deformação para barras de baixo carbono (BOYER, 2002).

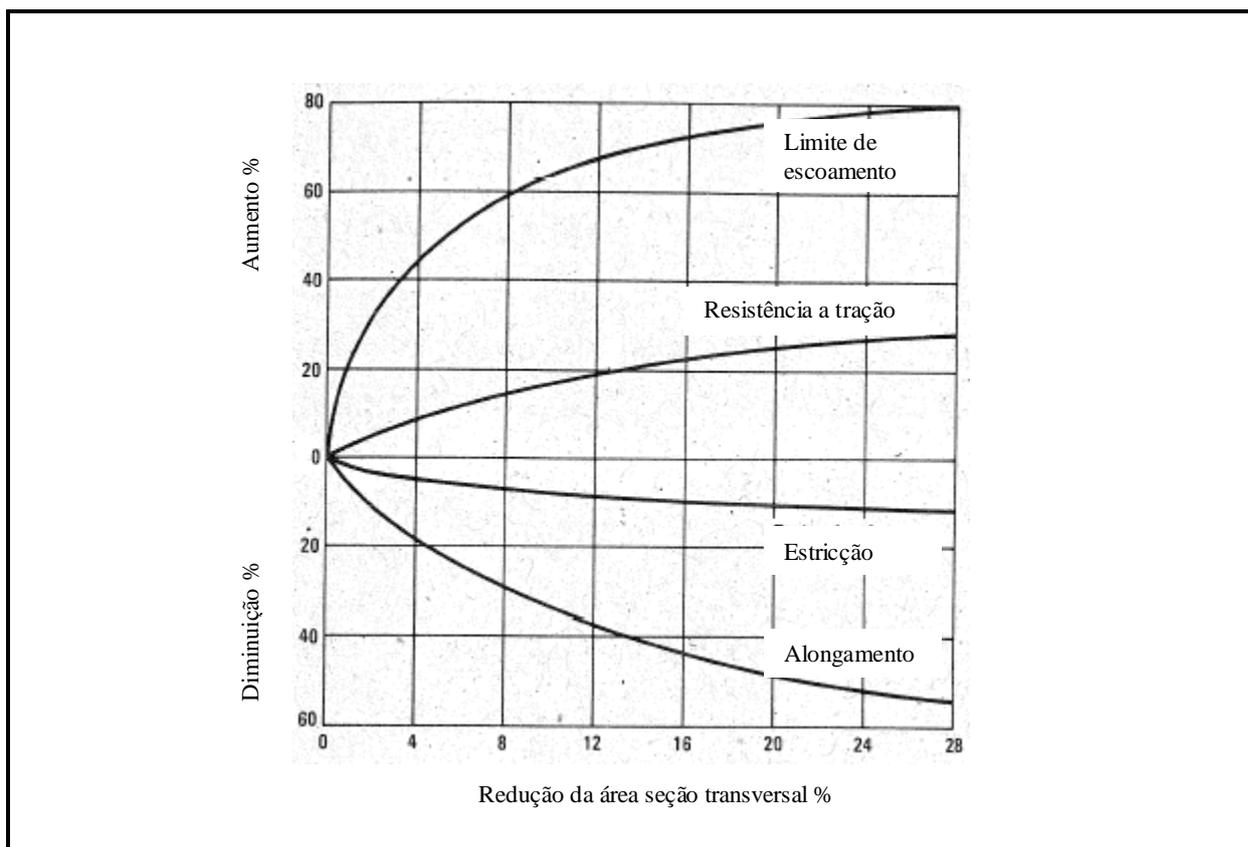


Fig. 2.6 – Efeito da trefilação nas propriedades mecânicas para barras de aço baixo carbono (BOYER, 2002).

O processo de trefilação aumenta o limite de escoamento em torno de 40% e a resistência à tração ao menos em 10%. Quando uma resistência maior é necessária, as peças que serão trefiladas podem sofrer tratamento térmico anteriormente, aumentando assim sua resistência a tração ou, ainda, uma modificação na composição química do material (BOYER, 2001).

Heitmann e Bhattacharya (HEITMANN, 2000) demonstram que a trefilação de aços ao carbono e microligados aumentam a resistência do material, bem como aumentam a tenacidade, sem perder a performance de usinabilidade, o que é importante para diversos processos de produção.

A análise do processo de trefilação envolve a consideração de uma série de problemas, tais como: esforço necessário para executar a operação, lubrificação na interface feira/metal, acabamento e propriedades mecânicas finais do produto, evolução térmica do produto sob processamento, dentre outros (NAKAGIRI, 2001; MACHERAUCH, 1987).

Apesar da trefilação de barras circulares aparentar ser um dos processos de conformação mecânica mais simples, as discrepâncias existentes entre os resultados previstos pelos diferentes modelos teóricos para os esforços de trefilação e os valores medidos indica que este processo está longe de ser compreendido em profundidade (NAKAGIRI, 2001). A seguir, serão descritas as etapas do processo de trefilação combinada separadamente.

### 2.2.1 Pré Endireitamento

O processo de pré-endireitamento na trefila tem o objetivo de retirar a curvatura causada pela laminação a quente na forma de bobinas. Além disto, também serve como um quebra carepa do material. Pode consistir na passagem da seção do material por 7 rolos dispostos na posição horizontal e posteriormente 6 rolos na posição vertical. Poucos estudos foram realizados utilizando modelos matemáticos para prever a curvatura final a partir da posição, número de rolos e propriedades do material (MISCHKE, 1987). Em estudo mais recente (NASTRAN, 2002), foi desenvolvido um modelo numérico, o qual é utilizado para definir diversas configurações dos rolos para estabilizar a geometria final e as propriedades mecânicas do fio-máquina. A figura 2.7 ilustra os resultados do estudo apresentando a influência da interferência utilizada nos rolos pré-endireitadores na redução do limite de resistência à tração do aço.

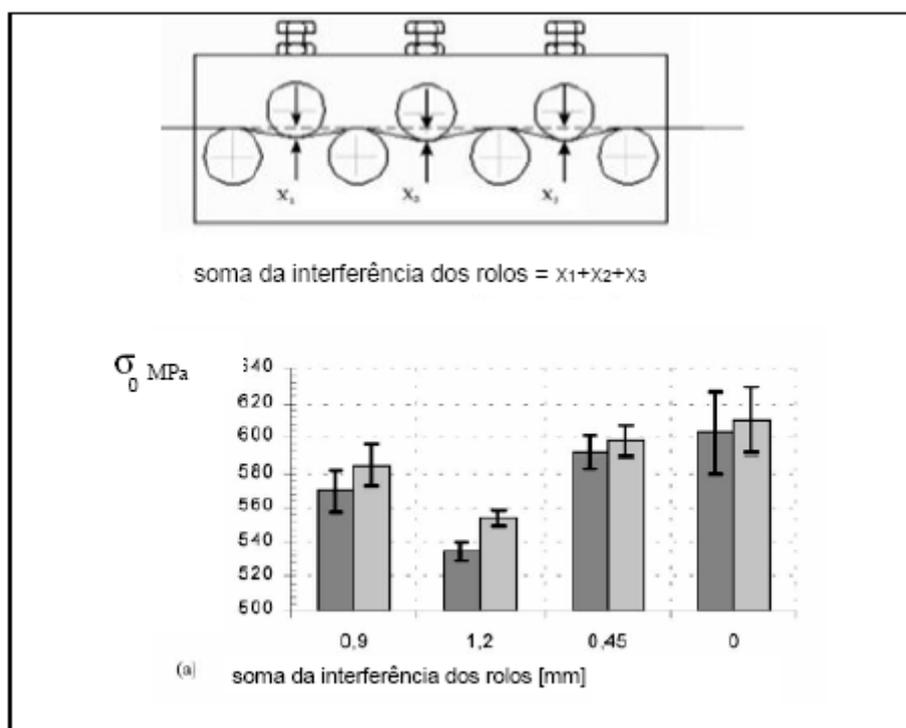


Fig. 2.7 – Influência da interferência dos rolos pré-endireitadores no limite de escoamento (NASTRAN, 2002).

### 2.2.2 Jateamento com Granalha

O processo posterior é o jateamento com granalha, o qual consiste na formação de um jato de partículas pequenas para impacto na superfície do material para mudança na condição superficial, buscando limpeza na região do jateamento, conforme ilustrado na figura 2.8.

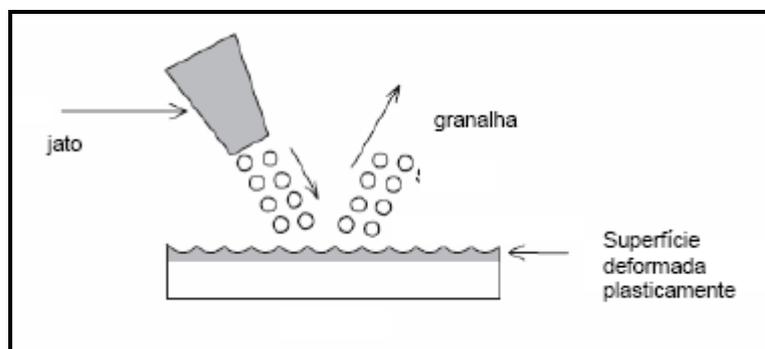


Fig. 2.8 – Ilustração do processo de jateamento com granalha (EZEILO, 2003).

O intuito é a retirada dos óxidos presentes, formados durante a laminação a quente do aço, prejudiciais ao processo de trefilação e atrito com a superfície da fieira. As partículas utilizadas são basicamente feitas de aço, cerâmica ou plástico, com tamanhos variando entre 50µm até 6 mm em diâmetro, e tendo velocidades de até 150 m/s. No caso estudado, as esferas pertencem a classe S-170 de acordo com a norma SAE J444, a qual define a composição química e dispersão granulométrica permitida, tendo um tamanho médio de 0,4 mm.

Este processo, ao deformar plasticamente a superfície, gera esforços trativos no interior causando tensões residuais compressivas na superfície. Estas tensões compressivas na superfície são de grande valia para peças como molas, eixos, engrenagens e rolamentos nos quais grandes tensões são aplicadas em serviço (SAE, 2003), embora não seja o objeto principal desta etapa. No estudo das tensões residuais desenvolvidas por este processo, nota-se um aumento da vida em fadiga e um aumento do limite de escoamento. Este efeito pode ser anulado caso o componente seja submetido na vida em fadiga (YANHUI, 2005). Porém, na trefilação combinada, possivelmente, estes efeitos serão superpostos pelas tensões residuais aplicadas após o jateamento.

### 2.2.3 Trefilação

Há três maneiras fundamentais para produzir uma peça de aço com seção especial (características intrínsecas): extrusão a quente, laminação com forma definida e trefilação. Das três formas, a trefilação pode ser considerada a mais conhecida. A trefilação é um processo de conformação a frio onde existe a redução da seção da barra ou fio máquina quando a mesma passa por um perfil (ferramenta chamada fieira). Esta ferramenta (matriz) composta por metal duro, pode ser confeccionada com diversos perfis e geometrias dependendo da aplicação do produto. As fieiras mais utilizadas são as de metal duro com carboneto de tungstênio, devido à sua grande durabilidade e alta dureza (90 HRC). Elas são produzidas a partir da compressão de pós metálicos, sinterizados a altas temperaturas em fornos com atmosfera controlada, têm correção de sua forma por raspagem e polimento com pasta de diamante (BOYER, 2002; NEWBURY, 2004; MACKENZIE, 1980; YANHUI, 2005).

Este processo mecânico, a trefilação, produz uma combinação de propriedades que pode ser benéfica, considerando a variedade e diversidade de produção e suas aplicabilidades: combina-se resistência a tração, alongamento e escoamento, além de outros fatores do processo de trefilação e, por fim, encontra-se a capacidade para produzir barras ou peças com características extremamente intrínsecas ao processo. Na figura 2.9 pode ser observado um detalhe da fieira. Conforme ilustrado, o formato da matriz consiste basicamente em um ângulo de redução ( $\alpha$ ), comprimento do cone ( $l$ ), comprimento paralelo ( $L_p$ ), um ângulo de saída ( $\beta$ ) e parâmetro  $\Delta$  (WRIGHT, 1979). O material (barra de aço, no caso) deforma-se a medida que atravessa a fieira e, desta maneira, tem seu diâmetro reduzido. Como resultado, obtém-se um produto de seção menor e comprimento maior, com boa qualidade superficial e excelente controle dimensional. Geralmente, tanto a barra original quanto o produto final possuem simetria axial, ainda que esta condição não seja estritamente necessária.

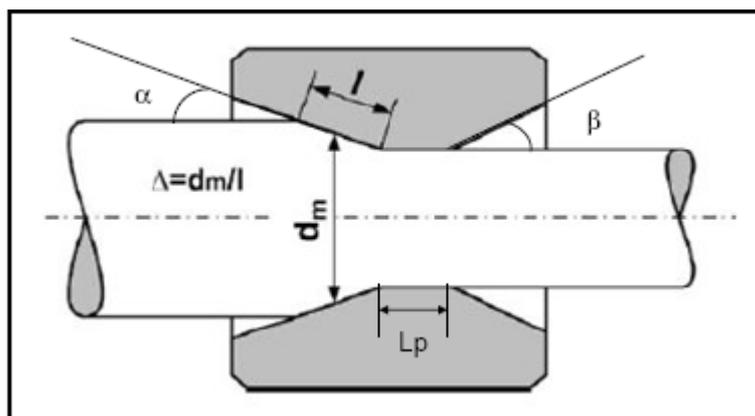


Fig. 2.9 – Definição do perfil da fieira e do parâmetro  $\Delta$  (WRIGHT, 1979)

Nakagiri et al (NAKAGIRI, 2001) estudou a influência que a geometria da fieira exercia na tensão de trefilação por estudos de elementos finitos. Segundo seus estudos, existem dois tipos de fieiras usualmente utilizadas na indústria: a fieira cônica e a fieira angular conforme a figura 2.10. A fieira tipo Angular (A-type) quer dizer que a geometria da fieira segue com uma constante do semi-ângulo  $\alpha$  e a fieira cônica circular (C-type) quer dizer que a geometria tem um raio circular constante  $R$ .

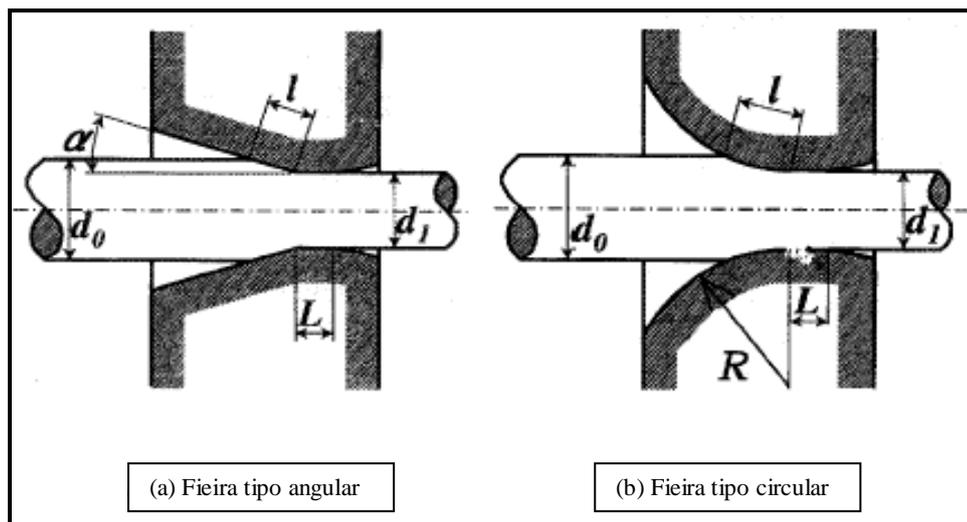


Fig. 2.10 - Parâmetros da geometria da fieira que influenciam no processo de trefilação (NAKAGIRI, 2001).

A fieira tipo angular é indicada para trefilar materiais duros e a tipo circular para materiais macios. Quando o fio máquina entra em contato com a fieira tipo circular, encontra uma grande zona de contato na entrada devido ao ângulo. Na saída ou extração do fio, o ângulo de contato alcança quando  $0^\circ$  (NAKAGIRI, 2001).

Focando na fieira tipo angular, temos alguns pontos importantes, tais como, o semi-ângulo  $\alpha$  e os pontos de inflexão que podem gerar o empenamento.

#### Parâmetro Delta

O parâmetro  $\Delta$  consiste na fração entre o comprimento de redução ( $l$ ) e o diâmetro médio na região de redução  $d_m$  conforme descrito na equação 2.1 onde  $d_0$  é o diâmetro de entrada e  $d_1$  é o diâmetro de saída (WRIGHT, 1979).

$$\Delta = \frac{dm}{l} = \frac{d_0 + d_1}{d_0 - d_1} \cdot \text{sen } \alpha \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Um valor de  $\Delta$  menor sugere uma longa zona de deformação e aumenta o contato com a fieira. Isto resulta em trabalho por atrito em excesso e geração de calor necessitando boa lubrificação e um menor coeficiente de atrito. Em compensação, estes valores menores

possibilitam uma redução nos esforços para a fieira e maior durabilidade, além de diminuir o trabalho redundante e excesso de tensão no centro do material, prevenindo defeitos internos. Diversos projetos comerciais de fieira sugerem o parâmetro delta próximo a 3 para minimizar as tensões de trefilação. No entanto, uma redução do desgaste e da geração de defeitos é possível com delta menor do que 1,5 (SHEMENSKI, 1999). A figura 2.11 ilustra diversas zonas de deformação variando o parâmetro  $\Delta$ .

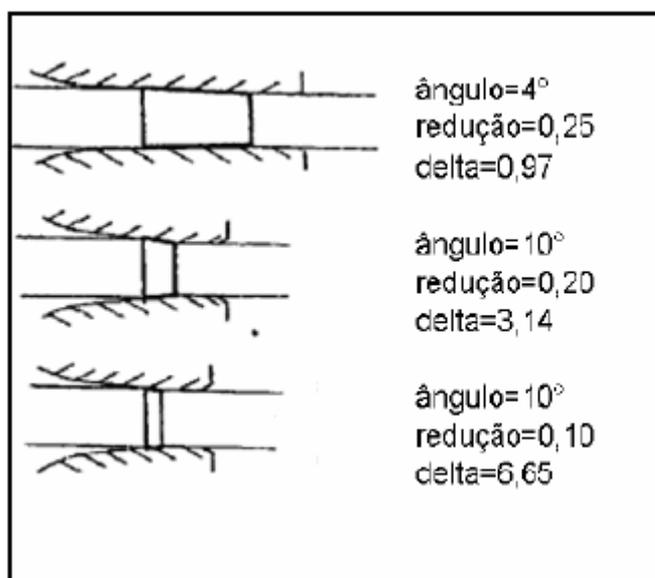


Fig. 2.11 – Zona de deformação na trefilação e variação no parâmetro  $\Delta$  (SHEMENSKI, 1999).

A zona de entrada é construída com um ângulo maior que o de trefilação, para facilitar o processo de lubrificação. Na saída, é necessária uma zona cilíndrica por razões de fabricação e manutenção da matriz, e para diminuir a velocidade de desgaste do diâmetro de saída da fieira (ASAKAWA, 2002).

Rivolta (RIVOLTA, 2004) também cita que um bom alinhamento da fieira com a linha de trefilação (fio máquina pós pré-endireitamento) é necessário para se ter o menor empenamento nas barras. Este alinhamento é feito com ajustes (caso necessário) ao longo do processo.

Wang e Argyropoulos (WANG, 2005) também estudaram através de elementos finitos um modelo de fieira, cuja geometria conhecida pudesse gerar um processo mais rápido e com as propriedades finais especificadas dentro dos requerimentos do cliente. As técnicas de análises analíticas do processo de trefilação são importantes no desenvolvimento de modelos

de deformação e na obtenção de dados e conhecimento da geometria das feiras. O método do limite superior (GUNASEKERA, 1982; BASILY, 1976; HOSHINO, 1980) e o método por elementos finitos (LEE, 1977; DARENDELIER, 1991; WEBSTER, 1978; KIM, 1999) são duas ferramentas utilizadas para lidar com conformação de metais e construção de programas de análise e simulação. Avitzur (AVITZUR, 1979; AVITZUR, 1974; AVITZUR, 1968) realizou análise de barras trefiladas usando o método do limite superior. Este método permite encontrar a energia, a potência e a força de trefilação. Além disto, não se pode obter a distribuição das tensões internas e da deformação. A análise por elementos finitos para uma seção de barra trefilada não estacionária é dada por Kym et al (KIM, 1999). O método de análise de elementos finitos foi utilizado por Wang (WANG, 2005) para lidar com o processo de trefilação. A idéia básica é assumir uma velocidade ao longo de uma direção e descrever a componente da velocidade em outras duas direções. Isto tem como vantagem redução do tempo de cálculos, acuracidade dos resultados e baixo custo. Utilizando este método baseado num programa de computador, podem ser obtidos: a média da força de trefilação, a distribuição do campo de velocidades, o campo de tensões e deformações e as taxas de deformação que o material (barra) é submetido.

Como conclusão do seu trabalho, Wang (WANG, 2005) indica que existe uma área de tensão-compressão que contribui com a força de trefilação para gerar uma área de deformação diretamente no processo de trefilação. Esta deformação contribui para o aparecimento do empenamento. Um bom perfil de feira deveria promover a deformação numa zona de deformação plástica uniforme, reduzindo assim a variável empenamento.

Este perfil também foi analisado por Nakagiri et al (NAKAGIRI, 2001) que concluem que, em feiras tipo angular, a tensão residual e o empenamento são altos quando a tensão de deformação for baixa. Para entender melhor, vemos a deformação plástica numa comparação dos processos de trefilação, laminação e forjamento, conforme a figura 2.12. As áreas de deformação estão indicadas em preto.

Considerando o processo de trefilação (a), temos um comprimento de feira  $l$  e um diâmetro inicial  $h_0$ . A zona I indica um contato pequeno entre o comprimento da feira  $l$  e a barra ( $l/h_0 < 0,1$  a  $0,2\text{mm}$ ). A zona III mostra que o comprimento da feira é  $l/h_0 > 0,4\text{mm}$ . Por último, o comprimento da feira tem um valor médio ( $l/h_0 = 0,1$  a  $0,4\text{mm}$ ) na Zona II.

Na zona I, o comprimento da feira é extremamente pequeno comparado com o diâmetro inicial da barra. Assim, o alongamento da superfície será maior do que no centro, e o centro mantém a sua volta, resultando em compressão na superfície.

Na zona II, a deformação plástica avança ao centro da barra, então o mesmo sofre deformação maior do que a superfície. Portanto, a tensão trativa é criada na superfície enquanto uma tensão compressiva é gerada no centro.

Por último, na zona III, o comprimento da fieira é grande em relação ao diâmetro da barra e a deformação plástica converge em toda a barra. Os valores da tensão de deformação são praticamente iguais em toda a peça, assim pouca tensão residual é gerada, ou seja, reduz o empenamento.

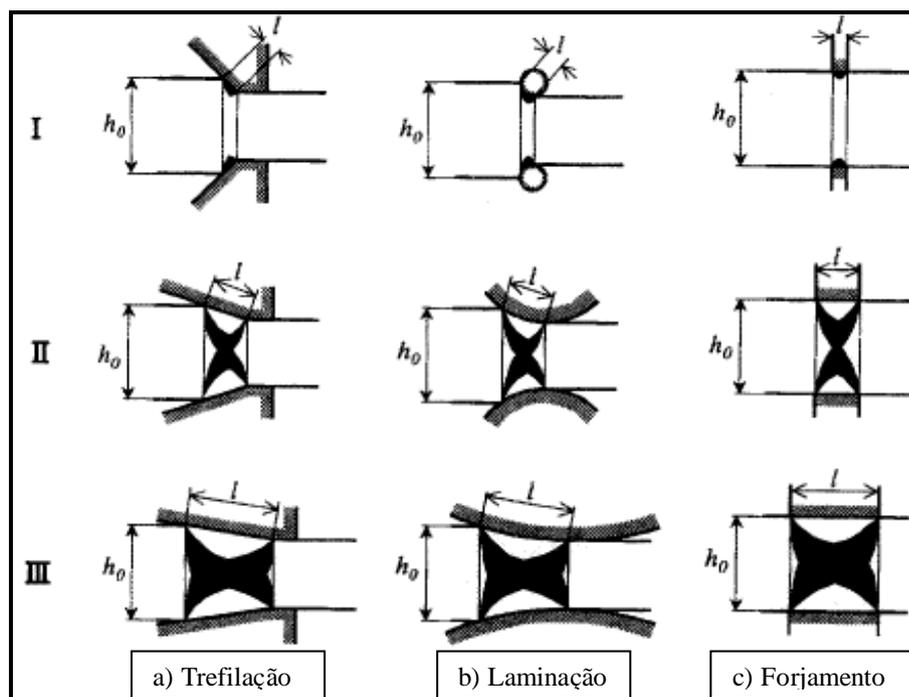


Fig. 2.12 – Relação entre o comprimento de contato da fieira  $l$  e o diâmetro inicial da barra  $h_0$  na deformação plástica (NAKAGIRI, 2001).

Este fenômeno acontece da mesma forma para a laminação e forjamento de barras.

Observando a figura 2.13, podemos verificar que durante a trefilação da barra, a deformação não é uniforme perto da superfície e no centro, ou seja, o fluxo do metal perto da superfície está atrasado em relação ao centro. Portanto, as tensões axiais da superfície tornam-se compressivas no centro, gerando distorções na barra e, em consequência disto, o empenamento (CETLIN, 2005).

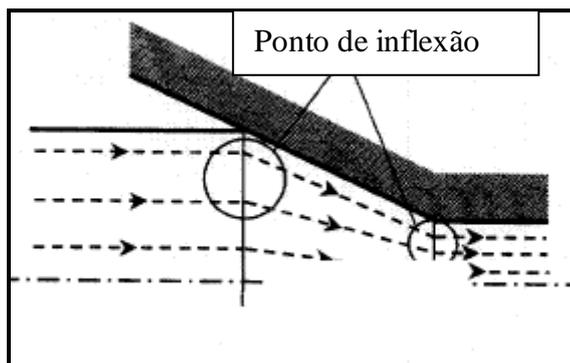


Fig. 2.13 – Influência dos pontos de inflexão no fluxo do metal durante a trefilação na entrada e saída da fiação (CETLIN, 2005).

#### 2.2.4 Endireitamento com Rolo Duplo

As barras trefiladas, que são usadas como produtos finais, devem cumprir severas exigências: tolerâncias dimensionais apertadas, ter boa rugosidade superficial, baixo empenamento e altas propriedades mecânicas (dureza, tração, alongamento, escoamento, etc) (BOYER, 2002). Por esta razão, o endireitamento é requerido, principalmente para redução do empenamento e polimento das barras. Ainda com referência a condição final da barra, a parte final mais importante do processo de trefilação é a operação de endireitamento. Conforme Mischke (MISCHKE, 1992), podemos definir três estágios diferentes no processo de endireitamento: da entrada do material, estabilização das condições de endireitamento e saída do material endireitado. O resultado deste processo (material endireitado) depende da curvatura dos rolos, propriedades mecânicas do material, distância e ângulo dos rolos, pressão dos rolos e flexibilidade da estrutura da máquina e as condições pré-setadas em cada rolo.

Para remover o empenamento de uma barra, é necessário “re-configurar” seu estado de tensões, criando uma distribuição uniforme, mantendo-a em um estado endireitado (SMITH, 2002). É esta a função do processo de endireitamento, o qual possui como produto barras com um baixo empenamento residual, sendo seu nível dependente do tipo de equipamento, de parâmetros de processo e das propriedades do material a ser endireitado. Por seu uso simples e por apresentar ótimos resultados, endireitadeiras de rolo duplo vêm sendo utilizadas largamente na indústria metalúrgica e metal mecânica. Devido ao seu princípio, elas trabalham baseadas na curvatura da região de contato entre barra e rolos (TALUKDER, 1981).

O processo de endireitamento é usualmente realizado por uma máquina de rolos duplo, com dois rolos hiperbólicos (um convexo e outro côncavo – figura 2.14a) que impõe rotação e compressão transversal na barra que está passando através da máquina (entre guias de nylon) em roto-translação. Em operação, os dois rolos giram na mesma direção, fazendo com que a barra, presa entre duas guias, gire em sentido contrário devido a fricção dos rolos, conforme ilustra a figura 2.14b (WU, 1999). O modelamento matemático da dinâmica e cinética envolvida no processo foi elaborado inicialmente por Talukder e Jonhson (TALUKDER, 1981), sugerindo através deste uma otimização para a velocidade e empenamento do material.

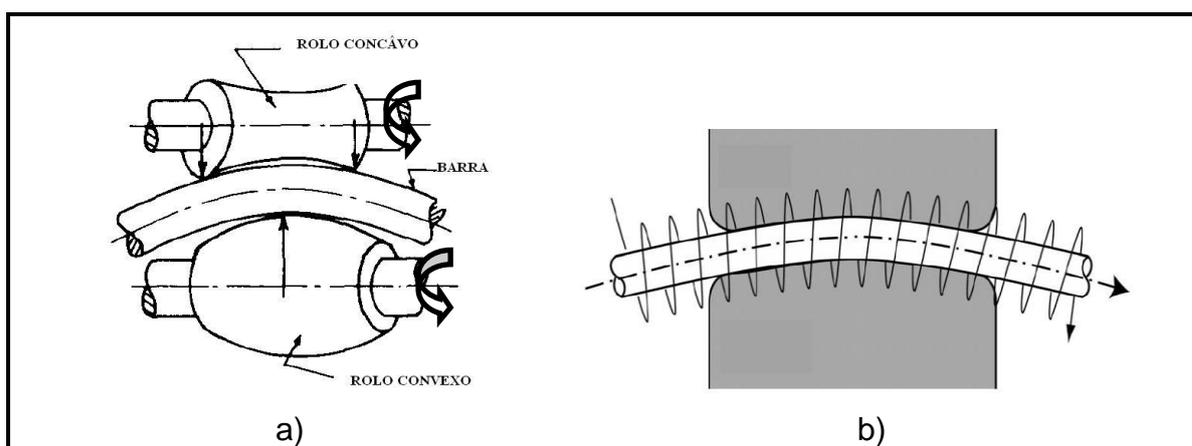


Fig. 2.14 – Endireitamento com dois rolos (WU, 1999)

Neste equipamento, o rolo côncavo é usado como uma espécie de batente, controlando assim o nível de flexão da barra e, o outro rolo, convexo, também chamado “rolo endireitador”, força a barra a se moldar na forma do rolo côncavo (figura 2.15). Os rolos giram no seu próprio eixo, visando criar um nível de tensão homogêneo ao longo do diâmetro e comprimento da barra. Como mencionado anteriormente, a barra é impulsionada a passar pelos rolos com um dado número de revoluções enquanto flexionada. Cada revolução aumenta a uniformidade das tensões residuais (WU, 1999).

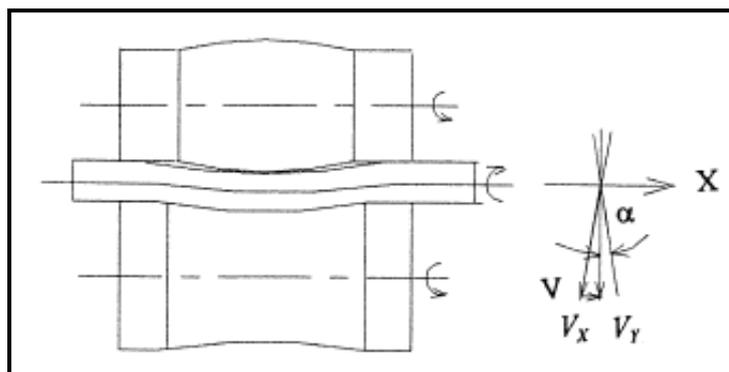


Fig. 2.15- Forma esquemática de uma endireitadeira duplo rolos (WU, 1999)

Um parâmetro fundamental no processo é o perfil geométrico dos rolos. Este perfil é uma curva hiperbólica gerada por simulações computacionais, as quais são baseadas em ângulos de ajuste entre os rolos que otimizam a linha de contato com a barra. É muito importante que seja utilizado os ângulos de ajuste corretos, os quais são considerados adequados quando (HAUK, 1997):

- o ângulo setado entre os rolos, para toda a faixa de bitola de trabalho do equipamento, permite um contato linear de 100% da extensão do rolo.

- a distância entre uma revolução, ou seja, uma volta completa (figura 2.16a e 2.16b) da barra de maior bitola a ser processada é menor que o comprimento do perfil do rolo. Na figura 2.16a foi marcado um ponto como referência na barra. Na figura 2.16b marcou-se outro ponto após uma revolução completa e foi medida esta distância a fim de verificar se o perfil era o desejado (PAGE, 2007).

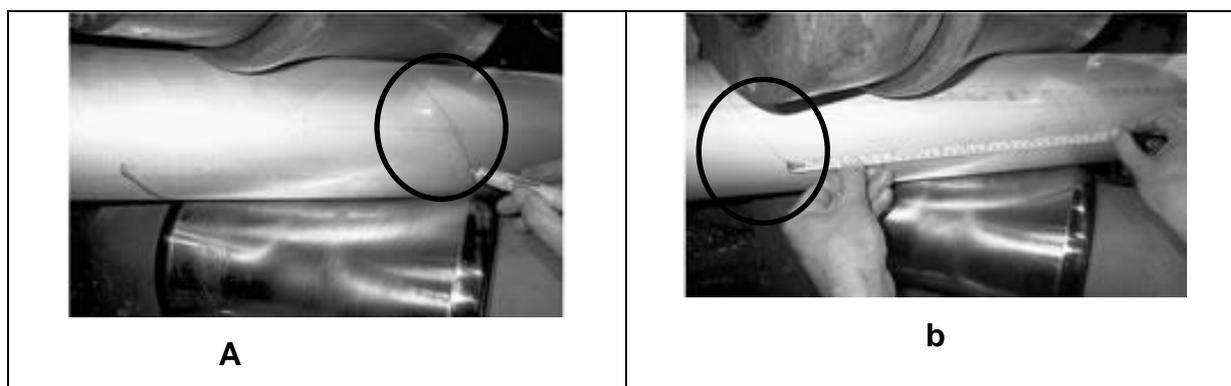


Fig. 2.16- Distância entre uma revolução completa (a e b) (PAGE, 2007).

Devido às suas características, o processo pode ser utilizado com muita velocidade em uma linha de produção, uma vez que as barras entram em um lado da máquina e saem pelo outro num processo contínuo. O processo apenas precisa ser interrompido quando forem necessários ajustes para diferentes produtos (bitola, limite de escoamento e empenamento de entrada). Também é muito importante para o controle de desgaste do equipamento, pois altas velocidades, associadas ao empenamento do material, fazem com que a barra colida fortemente com componentes da máquina, podendo levar a quebra desta máquina.

Durante o processo de endireitamento são controlados os ângulos superiores e inferiores além da força (pressão) exercida pelos mesmos sobre o material. A figura 2.17 apresenta os ângulos controlados em relação ao eixo do equipamento.

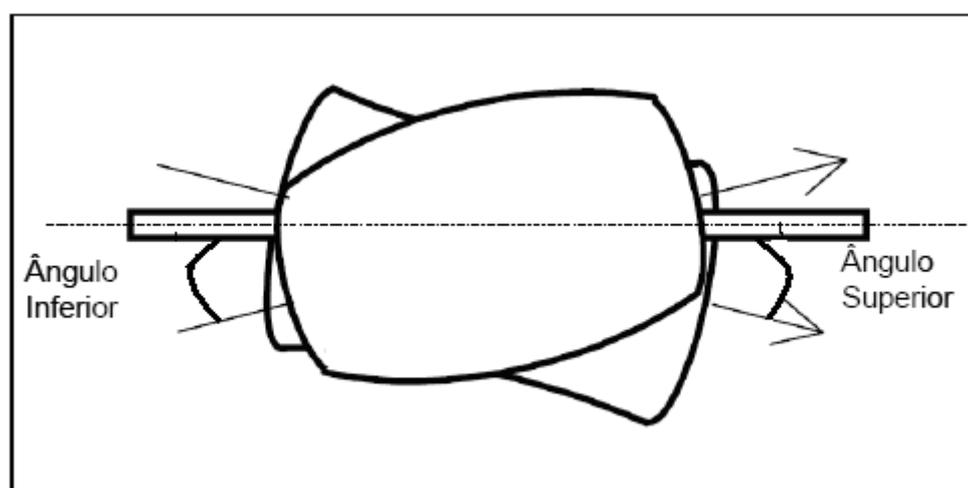


Fig. 2.17 – Vista inferior dos rolos dos ângulos de endireitamento (METZ, 2007)

A utilização na parametrização do processo com uma faixa de ângulos (inferior e superior) maiores tem como objetivo que a barra passe pelos rolos com uma velocidade maior e menos giro, fazendo com que a taxa de deformação seja mais alta, podendo-se assim não endireitar o material. A influência dos ângulos dos rolos na velocidade pode ser explicada pela geometria dos mesmos.

Os ângulos são variáveis associadas mais fortemente ao limite de escoamento do material a ser processado. É a partir da variação dos ângulos que é possível atingir diversos níveis de tensões gerados sobre o material.

A pressão dada entre os rolos e as barras processadas provoca um aumento na tensão gerada no processo, interferindo também diretamente no acabamento do produto final. Quanto maior a pressão, maior o esforço gerado (tensão), maior o polimento na barra. Porém, deve-se

ter cuidado com esta variável, pois o polimento está também relacionado ao acabamento dos rolos, ou seja, se a superfície estiver riscada ou rugosa, o polimento será afetado.

Nas últimas décadas, a utilização de softwares avançados de computação promoveu a aplicação de ferramentas como elementos finitos para simulação de processos de manufatura. Um exemplo típico da aplicação deste método é a simulação do processo de conformação a frio a partir de fio-máquina. A fim de se ter uma maior acuracidade no resultado da simulação por elementos finitos, deve-se descrever a evolução das propriedades do material ao longo do processo usado. Em outras palavras, é necessário construir equações matemáticas que correlacionam propriedades mecânicas e processo.

Recentemente, um novo modelamento matemático possibilitou a geração de um algoritmo para cálculo de empenamento final das barras e indicou os parâmetros críticos neste processo como sendo o raio de curvatura dos rolos e o passo (relação entre rotação e avanço da barra) gerado pelo ângulo de ajuste (WU, 1999). Este estudo leva em consideração o efeito mola inerente aos metais utilizados. Através da análise por elementos finitos, também foi possível entender o processo e definir um modelo para o projeto do perfil dos rolos, processo até hoje empírico, baseado unicamente em teste e experiência das fábricas (ONODA, 2002). Neste estudo, é definida a expressão “plastic ratio” através da qual se relacionam as curvas de deformação do material com o perfil dos rolos utilizados. Quanto maior esta taxa, maior o volume deformado plasticamente durante o processo. No mesmo artigo, é definida uma taxa ótima de 60%. A figura 2.18 ilustra esta definição.

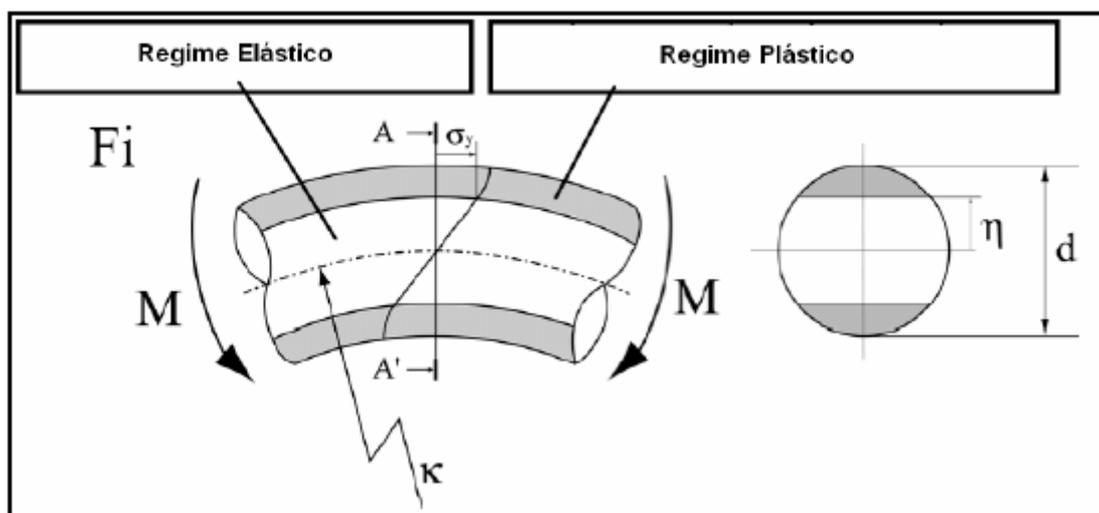


Fig. 2.18 – Ilustração do termo “Plastic Ratio” utilizado para quantificar a zona deformada plasticamente durante o endireitamento (ONODA, 2002)

Nesta etapa do processo, pode ser observada uma redução na tensão de escoamento causada pelo processo de amolecimento gerado pela deformação cíclica. Este fenômeno é conhecido como efeito Bauschinger. Neste fenômeno, nota-se que as tensões de escoamento de alguns materiais são menores após aplicação de tensões de sinal contrário, causando uma histerese devido ao deslocamento e movimentação de discordâncias e barreiras na estrutura cristalina (CHEN, 1999).

### 2.3 Análise do Processo de Trefilação de Barras de Seção Circular

A análise do processo de trefilação envolve a consideração de uma série de problemas, tais como: esforço necessário para executar a operação, lubrificação na interface fieira/metal, acabamento e propriedades mecânicas finais do produto, evolução térmica do produto sob processamento, dentre outros.

Abaixo serão abordadas as previsões do esforço necessário para executar a operação e alguns problemas associados à maneira como os metais se deformam ao passar pelas fieiras.

Apesar da trefilação de barras de seção circular aparentar ser um dos processos de conformação mecânica mais simples, as discrepâncias existentes entre os resultados previstos pelos diferentes modelos teóricos para os esforços de trefilação e os valores medidos indica que este processo está longe de ser compreendido em profundidade.

Analisa-se, a seguir, o problema de previsão dos esforços necessários para a realização do processo de trefilação de barras de seção circular empregando os métodos (CETLIN, 2005):

- deformação homogênea;
- método dos discos;
- método do limite superior;

Os esforços serão analisados basicamente em função de quatro variáveis: a redução de área, o ângulo da matriz, as condições de atrito na interface fieira/metal e as propriedades mecânicas do material.

### 2.3.1 Deformação Homogênea

Defini-se tensão de trefilação  $\sigma_f$  como a força  $F$  necessária para executar a operação, dividida pela área da seção transversal do metal após a trefilação  $A_f$ . A tensão de trefilação é expressa pela equação 2.4 que, para seções circulares, resulta na equação 2.5, onde  $Y$  é a tensão de escoamento do material já trefilado,  $A_i$  é a área inicial,  $A_f$  a área final,  $D_i$  diâmetro inicial e  $D_f$  diâmetro final.

$$\sigma_f = Y \ln \left( \frac{A_i}{A_f} \right) \quad (\text{Eq. 2.4})$$

$$\sigma_f = Y \ln \left( \frac{D_i}{D_f} \right)^2 = 2Y \ln \left( \frac{D_i}{D_f} \right) \quad (\text{Eq. 2.5})$$

### 2.3.2 Método dos Discos

Este método baseia-se em considerações de equilíbrio realizadas sobre um elemento que está sendo deformado. A descrição do processo de deformação é idealizada como indicado na figura 2.19a, juntamente com suas dimensões geométricas e nomenclatura a ser empregada.

A direção axial é considerada como a de variação dominante das tensões, e serão expostas constantes as tensões em planos perpendiculares ao eixo. Na figura 2.19b, apresenta-se um elemento da zona de deformação, com as tensões que atuam sobre ele. Existem três forças que devem ser consideradas, cujas componentes na direção axial são:

Força originada pelas tensões longitudinais, representada na equação 2.6.

$$\sigma_x + d\sigma_x \frac{\pi}{4} \left( \frac{D}{dD} \right)^2 - \frac{\sigma_x \cdot \pi}{4D^2} \quad (\text{Eq. 2.6})$$

Força originada pela pressão aplicada pela matriz, representada na equação 2.7.

$$p \cdot \left( \frac{\pi D dx}{\cos \alpha} \right) \cdot \text{sen } \alpha \quad (\text{Eq. 2.7})$$

Força originada pelas tensões de atrito, representada na equação 2.8.

$$\mu_p \left( \pi D \frac{dx}{\cos \alpha} \right) \cos \alpha \quad (\text{Eq. 2.8})$$

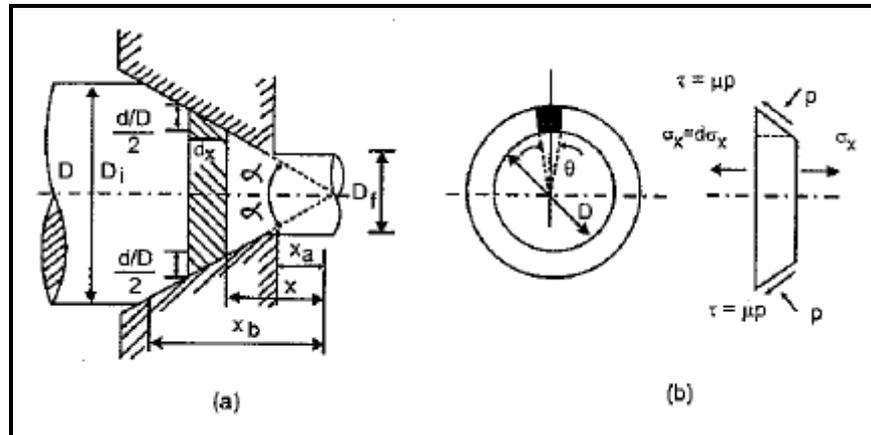


Fig. 2.19 – Detalhe da geometria e as tensões envolvidas no processo de trefilação, de acordo com o método dos discos (CETLIN, 2005)

Desenvolvendo matematicamente as equações, obtém-se a equação 2.9 que representa a tensão de trefilação, onde  $B = \mu \operatorname{ctg} \alpha$

$$\sigma_f = Y \frac{1+B}{B} \left[ 1 - \left( \frac{D_f}{D_i} \right)^{2B} \right] \quad (\text{Eq. 2.9})$$

### 2.3.3 Trabalho Redundante

A equação 2.9 permite calcular a tensão de trefilação levando em consideração a influência do atrito e do encruamento do material.

Existe outro aspecto não considerado na análise anterior, presente na maioria dos processos de conformação mecânica, que será ilustrado com ajuda da figura 2.20. Será acompanhada a trajetória de um elemento de metal próximo à superfície. Este se aproxima da matriz com um movimento paralelo ao eixo. Ao entrar em contato com a matriz, adiciona a

sua velocidade inicial uma componente perpendicular ao eixo (radial). Ao abandonar a matriz, segue o movimento paralelo ao eixo. Como se deduz da figura 2.20, o material sofre um processo interno de deformações cisalhantes (ou distorção), além daquele necessário para a sua deformação homogênea, e que não contribui para as mudanças dimensionais da barra trefilada. Essa deformação extra é chamada de deformação redundante ou, também, desde que envolva trabalho de deformação plástica, trabalho redundante. É fácil compreender que o trabalho redundante (ou distorção) será maior quanto maior for o ângulo da matriz. Como o atrito influi na geometria do fluxo, o trabalho redundante não seria totalmente independente de  $\mu$ . No entanto, foi demonstrado experimentalmente que, para uma ampla faixa de materiais e lubrificantes, esta dependência, quando existe, não afeta de forma sensível o trabalho redundante, o qual dependeria somente da geometria da fiação. Assim, o trabalho redundante torna-se mais notável quanto maior for o ângulo da fiação. Cetlin demonstrou ainda que este trabalho cresce ao diminuir a redução imposta ao metal (CETLIN, 2005).

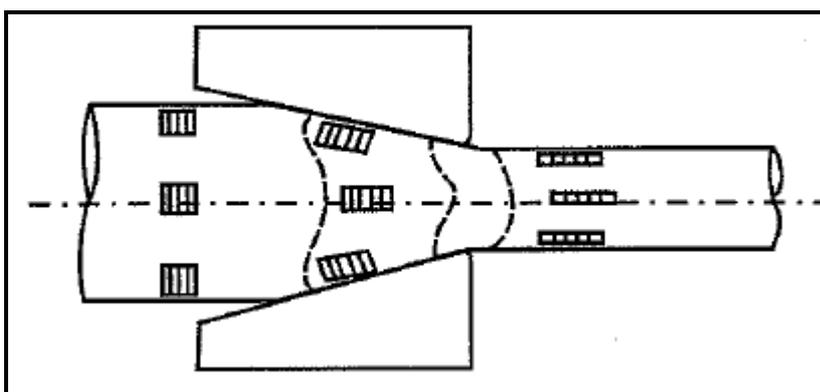


Fig. 2.20 – Esquematização da deformação redundante (CETLIN, 2005)

Como o trabalho redundante envolve deformação plástica, também contribui para o processo de endurecimento do material. Dessa forma, comumente para um só passe de trefilação, a tensão de escoamento do material trefilado é superior a tensão de escoamento de um material com a mesma quantidade de deformação homogênea.

Usualmente, o efeito do trabalho redundante será maior nas camadas superficiais do que naquelas próximas ao eixo da barra. Em consequência, o processo de trefilação com ângulos grandes conduzirá a uma maior heterogeneidade das propriedades mecânicas na seção

transversal, e as camadas externas estarão mais encruadas, ou seja, teremos uma maior geração de tensões residuais elevadas na superfície.

Como na prática industrial empregam-se pequenos ângulos e grandes reduções, é em geral possível desprezar o efeito do trabalho redundante na avaliação das tensões de trefilação.

### 2.3.4 Solução através do Limite Superior

Para se obter a solução através do limite superior para certo processo, deve-se primeiramente obter uma descrição da geometria de deformação deste processo através de um campo de velocidades. Uma vez selecionado este campo, é possível calcular a força necessária para que o material siga tal esquema de deformações. Esta força será diferente para as diferentes concepções do processo.

Uma das soluções foi proposta por Avitzur (AVITZUR, 1979; AVITZUR, 1974) baseado na figura 2.21, expressa pela equação 2.15, onde  $V$  é a velocidade e,  $v_f$  a velocidade final e  $r_f$  é o raio final da barra.

$$V = -v_f r_f^2 \frac{\cos \theta}{r^2} \quad (\text{Eq. 2.15})$$

Tal campo de velocidade consiste em um campo esférico radial, sendo a zona de deformação pelos setores esféricos, concêntricos  $\Gamma_1$  e  $\Gamma_2$  cujos centros coincidem com o vértice  $O$  do cone da matriz, como mostrado na figura 2.21.

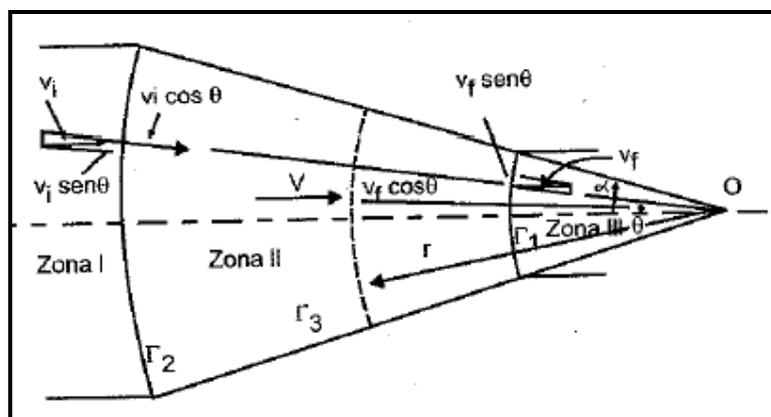


Fig. 2.21 – Campo de velocidade de Avitzur (AVITZUR, 1974)

A partir do campo de velocidades, é possível calcular a energia necessária para deformar uma barra de certo raio inicial  $R_i$  até o raio final  $R_f$ . Admiti-se que neste modelo, as alterações geométricas ocorram exclusivamente na zona II (figura 2.22), único volume submetido a deformação plástica, não existindo, então, deformações deste tipo nas zonas I e III. Em consequência, o material é considerado rígido nestas zonas e seu movimento não acarreta gastos de energia.

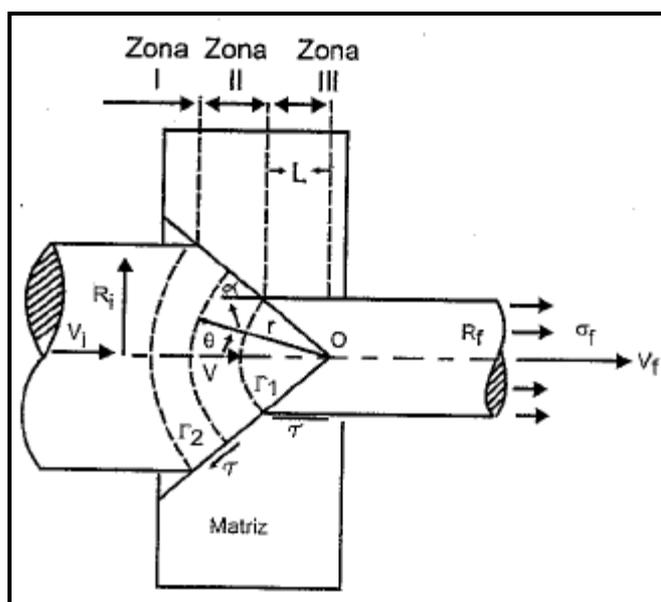


Fig. 2.22 – Regiões características de dissipação de energia segundo o modelo de Avitzur (CETLIN, 2005)

Na presente descrição serão consideradas três fontes de dissipação de energia:

- energia de deformação interna;
- energia perdida nas superfícies onde existem descontinuidades de velocidade ( $\Gamma_1$  e  $\Gamma_2$ ).
- energia perdida por atrito na interface matriz/barra ( $\Gamma_3$ ).

Realizando os cálculos necessários, obtém-se a tensão de trefilação aplicada conforme a equação 2.16.

$$\sigma_f = Y 2 f(\alpha) \ln \left( \frac{R_i}{R_f} \right) + \frac{2Y}{\sqrt{3}} \left[ \frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \operatorname{ctg} \alpha + m \operatorname{ctg} \alpha \right] \ln \left( \frac{R_i}{R_f} \right) + m \frac{L}{R_f} \quad (\text{Eq. 2.16})$$

onde  $L$  é o comprimento do paralelo,  $Y$  é a tensão de escoamento,  $R_i$  é o raio inicial,  $R_f$  é o raio final após a redução na fieira e  $m$  é a área de contato entre a matriz (leva em contato o atrito) e a barra e  $f(\alpha)$  é função do ângulo de fieira.

Na expressão 2.16, a contribuição para a tensão total de deformação interna é levada em consideração pelo termo:

$$U_i = 2 f(\alpha) Y \ln \left( \frac{R_i}{R_f} \right) \quad (\text{Eq. 2.17})$$

Esse valor corresponde a condições ideais de deformação (sem distorção). Para ângulos pequenos,  $f(\alpha)$  está próximo a unidade, razão pela qual se conclui que a influência do ângulo de trefilação sobre este fator é pequeno.

O efeito do atrito está considerado no termo:

$$U_f = \frac{2}{\sqrt{3}} Y m \operatorname{ctg} \alpha \ln \left( \frac{R_i}{R_f} \right) \quad (\text{Eq. 2.18})$$

É imediato que estas perdas serão maiores quanto menor é o ângulo da matriz, pelo motivo de se ter uma área de contato maior.

As perdas por distorção associadas às superfícies de descontinuidades  $\Gamma_1$  e  $\Gamma_2$  são dadas por:

$$U_r = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[ \frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \operatorname{ctg} \alpha \right] Y \quad (\text{Eq. 2.19})$$

que é nula para  $\alpha=0$  e constitui uma função crescente com  $\alpha$ .

Caso  $L$  seja um valor pequeno, que muitas vezes acontece, sua influência não será considerada sobre a tensão total.

Na figura 2.23 comparam-se os valores da tensão de trefilação relativa ( $\sigma_f / Y$ ) calculados através da equação 2.16 em função do semi-ângulo  $\alpha$  da fieira. Também cita-se que  $Y$  é a tensão de escoamento média, com valores obtidos experimentalmente por Wistreich (WISTREICH, 1959) com as reduções de 0, 10, 20, 30 e 40%. O  $m$  (área de contato entre

matriz e barra) é relativamente baixo. Observa-se a existência de um acordo razoável entre os valores teóricos e experimentais.

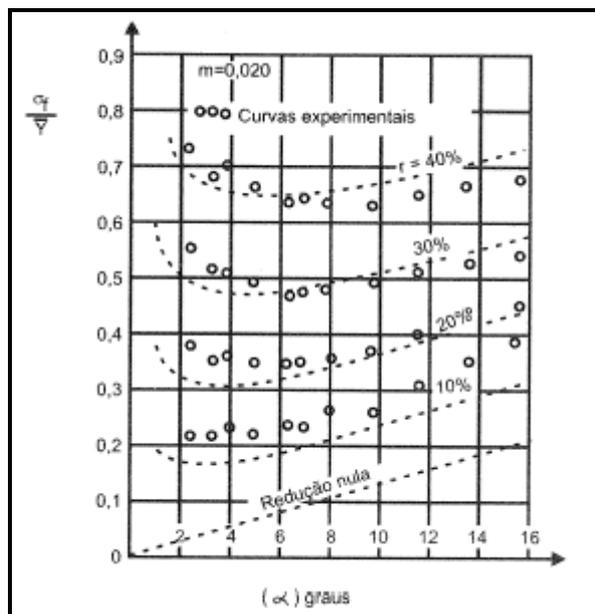


Fig. 2.23 – Características das tensões relativas de trefilação teóricas e experimentais (CETLIN, 2005)

A fim de verificar qual será o melhor ângulo de trefilação, resumindo em um gráfico as contribuições para a tensão total de trefilação consideradas pelas equações 2.17, 2.18 e 2.19, junto à tensão total relativa de trefilação, obtêm-se a figura 2.24. Neste caso, foram utilizados  $L=0$ ,  $m=0,03$  e  $r=25\%$  (redução).

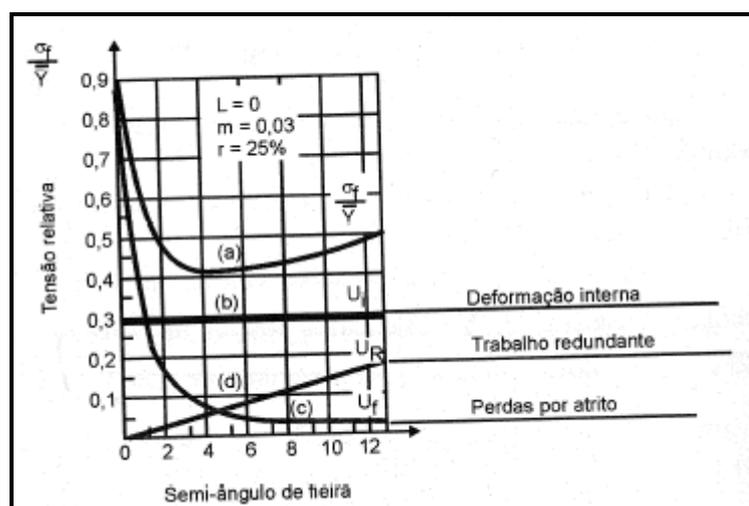


Fig. 2.24 – Representação gráfica das energias dissipadas em função do semi-ângulo da fieira (CETLIN, 2005)

Para ângulos pequenos da matriz, predomina o efeito do atrito, acarretando um elevado valor para a tensão total. A medida que o ângulo da matriz aumenta, o efeito do atrito diminui drasticamente, de modo que, apesar do aumento do trabalho redundante, existe uma diminuição na tensão total. A curva da tensão total (a) apresenta um mínimo em certo ângulo em que ocorre um compromisso entre as perdas por atrito (decrecentes para ângulos de matriz crescentes – curva c) e o trabalho redundante (crescente com o ângulo – curva d). O trabalho interno de deformação, por ser praticamente independente do ângulo (curva b), não influi na posição do mínimo. Naturalmente que este ângulo dependerá da redução em que se opera e das condições de atrito (de m). Este ângulo, que para cada caso minimiza a tensão de trefilação, denomina-se ângulo ótimo.

#### 2.4 Relação entre Propriedades Mecânicas e Microestrutura

As propriedades dos metais estão estreitamente ligadas a sua composição e microestrutura. É sabido que a transformação de fase de um material altera o estado de tensões (distorção, residuais, empenamento) do material. Alguns estudos sobre a relação de microestrutura e propriedades mecânicas em aços perlíticos trefilados têm mostrado que o limite de escoamento é determinado pelo espaçamento interlamelar perlítico (SRIVATSAN, 1998; SUN, 2001; EMBURY, 1966; DOLLAR, 1998; GIL-SEVILLANO, 1974).

Gil-Sevillano (GIL-SEVILLANO, 1974) sugere que para pequenos níveis de deformação na trefilação ( $\epsilon < 1$ ), as lamelas com diferentes orientações são forçadas a girar para posições paralelas com que o eixo fio-máquina está sendo trefilado.

Sun et al (SUN, 2001), com alguns experimentos mostraram que as metalografias de amostras de barra laminadas antes da trefila tinham uma microestrutura perlítica em colônias equiaxiais e uma pequena quantidade de ferrita ao longo do contorno de grão. Após a trefilação, os grãos sofreram um alongamento longitudinal na direção de trefilação. Com uma análise de MEV (microscópio eletrônico de varredura) foi verificado um decréscimo do espaçamento interlamelar da perlita diretamente proporcional ao aumento de redução que o fio-máquina fora submetido.

De acordo com a teoria das discordâncias, uma alta taxa de endurecimento implica na obstrução do plano de discordâncias no sistema. No primeiro estágio, a deformação plástica inicia-se e está concentrada na ferrita. Isto faz ter um aumento significativo na densidade de

discordâncias. Pode-se concluir que, neste estágio, a interação das discordâncias e a sua multiplicação dominam o processo de endurecimento. No segundo estágio, a densidade de discordâncias na ferrita alcançou o seu maior nível, e, assim, com aumento da tensão de trefilação, a configuração das discordâncias espalha-se sobre todo o material. Ao mesmo tempo, as colônias de perlita de diferentes orientações podem sofrer rotação na posição paralela com o eixo axial de trefilação, gerando uma queda na taxa de endurecimento. Durante o estágio três, como a subestrutura celular torna-se estabilizada, o movimento das discordâncias torna-se mais restrito na subestrutura celular, ao contrário, deslizando sobre a ferrita lamelar. Isto reduz o caminho livre de circulação das discordâncias e provoca o aumento da taxa de endurecimento (SUN, 2001). A figura 2.25 mostra o alinhamento da perlita com o eixo axial da trefilação.

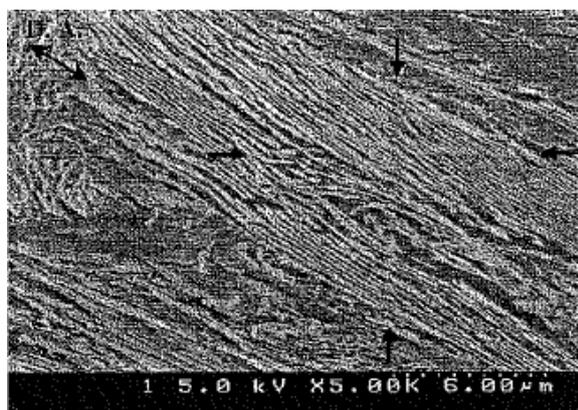


Fig. 2.25 – Microestrutura vista ao microscópio eletrônico de varredura mostrando o alinhamento da perlita com o fluxo de trefilação (SUN, 2001)

Sun et al (SUN, 2001) concluíram que os mecanismos de deformação no processo de trefilação levam em conta o movimento de discordância na ferrita, a rotação das colônias de perlita e o decréscimo do espaço inter-lamelar da perlita. Com o aumento da redução, o espaçamento interlamelar é reduzido na proporção que o fio máquina é submetido, ou seja, um número maior de passes de trefilação irá reduzir o espaçamento interlamelar. Com grandes reduções, há a fragmentação das lamelas de cementita, cisalhando as colônias de perlita, introduzindo deformação no processo que, por sua vez, afeta o comportamento de endurecimento da barra, modificando assim o estado de tensões do material (SUN, 2001).

## 2.5 Origem do Empenamento

A distorção de um componente pode ser classificada de duas formas, distorção de tamanho ou distorção de forma. A distorção de tamanho é causada pela expansão térmica ou contração térmica da microestrutura durante o aquecimento e resfriamento, e nos aços isto ocorre fundamentalmente devido à mudança na estrutura cristalina que acompanha as transformações de fase durante o tratamento térmico.

Distorções de forma são causadas por transformações térmicas e tensões não uniformes durante a variação de temperatura ao longo de partes do componente. Regiões localizadas que expandem ou contraem durante o rápido resfriamento ou aquecimento em relação a regiões adjacentes desenvolvem tensões que podem ser bastante altas, especialmente a altas temperaturas onde a microestrutura tem uma alta ductibilidade, que por sua vez irão ocasionar uma deformação plástica mudando a forma do componente. Por outro lado, se estas tensões geradas durante o aquecimento ou resfriamento não causarem uma distorção no componente, tensões residuais serão incorporadas ao componente.

O controle da distorção é um dos grandes desafios da produção econômica moderna em desenvolvimentos que estão sendo realizados na redução de peso em diversos materiais. Resolução de problemas e otimização de processos tem levado a melhorias, entretanto, a maioria está limitado a passos simples de manufatura ou parâmetros, que mostram um alto impacto no final do empenamento. Uma nova tendência é tratar o empenamento como um atributo da cadeia do processo e não apenas como um caso pontual do processo.

O fenômeno de empenamento é cientificamente estudado por pelo menos 100 anos, mas o conhecimento sobre ele e ações contra o mesmo são ainda imperfeitas ou limitadas em aspectos isolados. Embora o empenamento mais conhecido é o que resulta do tratamento térmico (devido à mudança de fase do material e rearranjo do retículo cristalino), também existe o empenamento devido a mecanismos mecânicos e outros ainda relacionados ao material, mas os fatores que influenciam na prática são diversos, muitas vezes excedendo o número de 200 (ZOCH, 2006). A figura 2.26 mostra um organograma de efeitos de geram o empenamento.

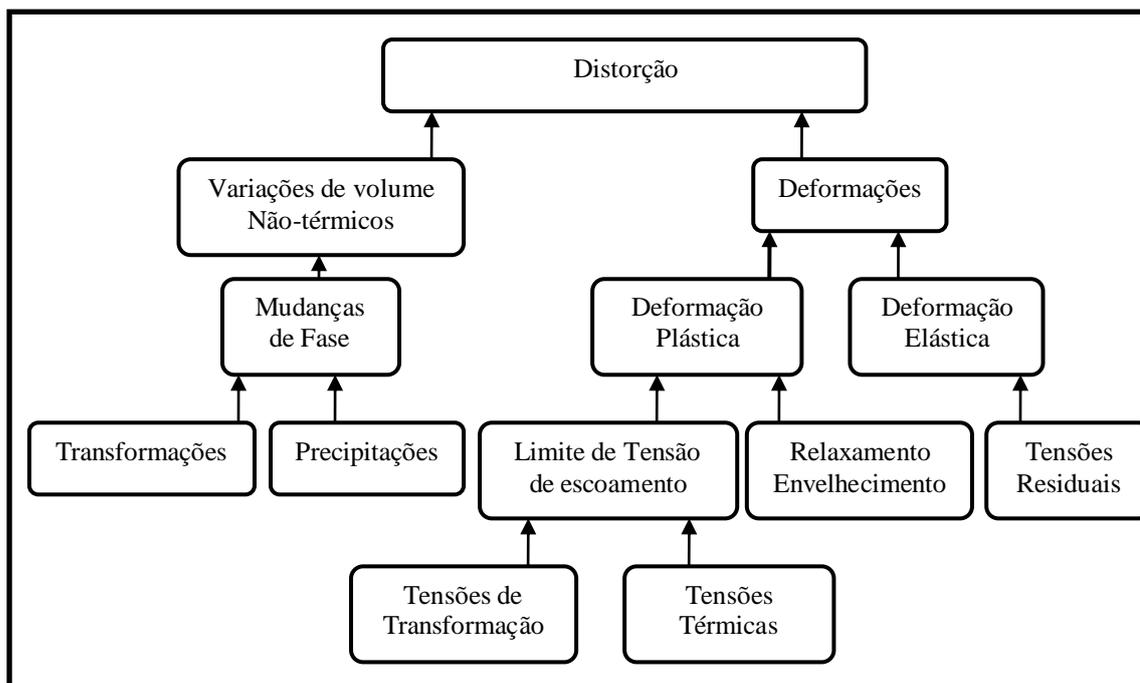


Fig. 2.26 – Causas do empenamento (ZOCH, 2006)

Desde o projeto, passando pelos processos de manufatura do material até a obtenção da peça pronta, cada passo influencia nas dimensões do material ou da peça que está sendo produzida, ou seja, a distorção é caracterizada pela alteração das dimensões do componente. A distorção também pode ser relacionada com o estado de tensões existente, além do tempo, temperatura, deformação e microestrutura do material, promovendo uma variação significativa das propriedades mecânicas do componente como pode ser observado na figura 2.27.

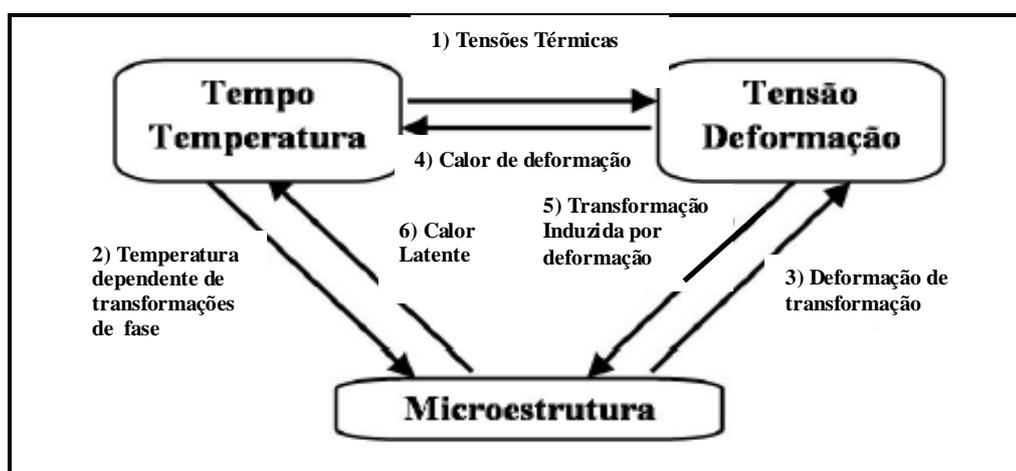


Fig. 2.27 – Relações entre tempo, temperatura, tensão, deformação e microestrutura nos materiais de engenharia (BHADESHIA, 2002)

As tensões térmicas são originadas pela ocorrência de gradientes de temperatura em uma seção do material. A variação de microestrutura, induzida pela temperatura, é outro fator que pode originar mudanças na distribuição de tensões, assim como a deformação por transformação, a deformação sob tensão e a transformação induzida por deformação (BHADESHIA, 2002).

Qualquer processo de manufatura que altere a forma do sólido ou que imprima algum gradiente de temperatura pode originar tensões no material e, em consequência disto, o empenamento. Sendo assim, processos como soldagem, o jato-percusão (shot peening), a usinagem, conformação mecânica, entre outros, originam tensões e, em consequência, a distorção do material (BHADESHIA, 2002; LU, 1996; WHITERS, 2001).

Para compensar o empenamento, normalmente, emprega-se no processo o método do sobremetal no material para posterior remoção, não afetando assim as tolerâncias dimensionais do mesmo ou pode ser realizado um endireitamento na área empenada. A vantagem de usar o endireitamento é que não teremos custos com processo de remoção de material, além de ser um processo rápido. No caso de ser alguma parte do componente com tratamento térmico, a barra ao ser endireitada irá manter a dureza uniforme se comparada ao processo de remoção de material, por exemplo, por descascamento. A partir destes fatos, fica claro que o processo de endireitamento é mais econômico e produtivo que os processos de remoção.

### 2.5.1 Empenamento

O empenamento é um tipo específico de distorção caracterizado por diferentes níveis de tensões residuais e deformações. Sobre a influência de tensões não uniformes, a barra pode assumir uma forma empenada.

O tipo de empenamento encontrado nas barras pode ser variado, sendo, de maneira geral, classificado como mostrado na figura 2.28.

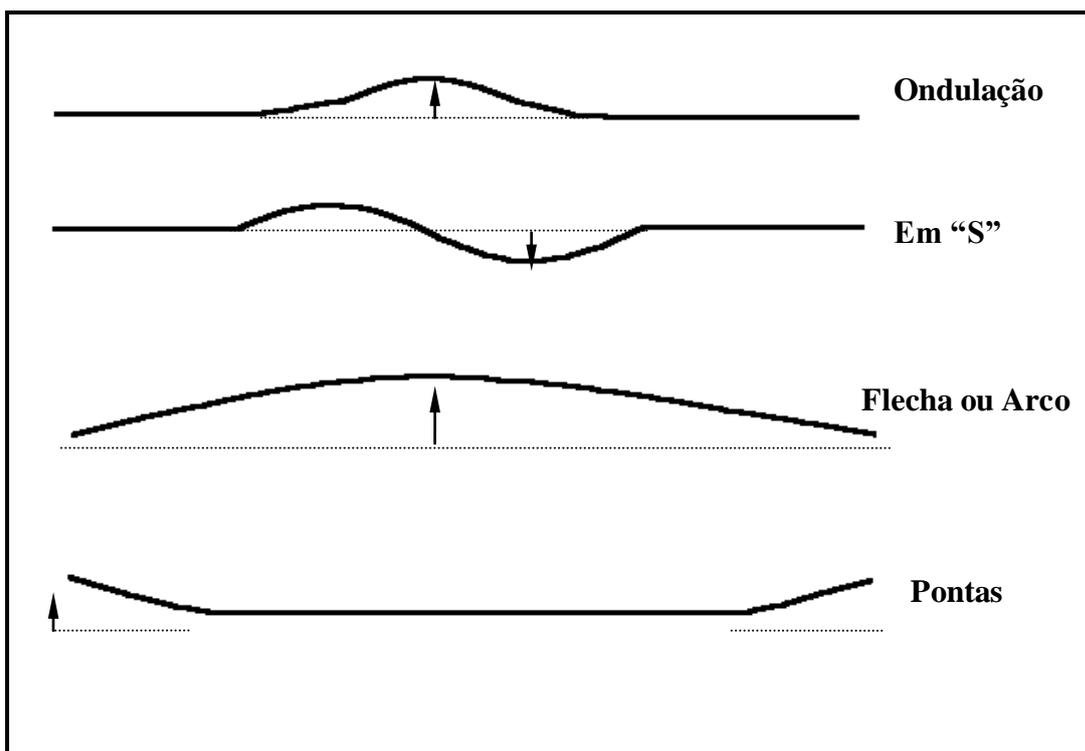


Fig. 2.28 - Tipos de empenamento (FREESE, 2007)

A medida do empenamento é dada em mm/m, ou seja, é a distância empenada dividida pelo comprimento empenado, conforme a figura 2.29.

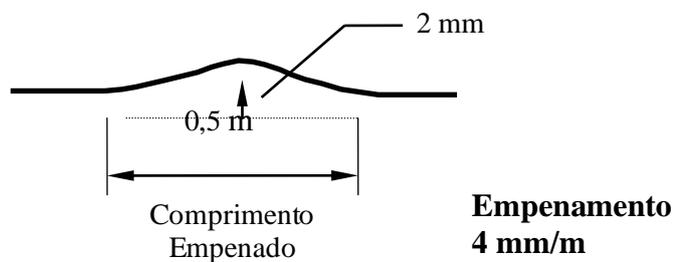


Fig. 2.29 - Medição do empenamento (FREESE, 2007)

## 2.6 Tensões Residuais

É difícil falar em empenamento e não citar tensão residual. É sabido que o empenamento está diretamente relacionado com a tensão residual. Tensões residuais são as tensões presentes em um corpo (estrutura ou componente mecânico) na ausência de

carregamentos externos e/ou gradientes de temperatura. As tensões residuais macroscópicas estão em equilíbrio para o corpo como um todo (MACHERAUCH, 1987; LU, 1996; WHITERS, 2001; NOYAN, 1987; HAUK, 1999).

### 2.6.1 Origem das Tensões Residuais

É estabelecido atualmente que nenhum material, componente ou estrutura de importância técnica se apresenta livre de tensões residuais (WHITERS, 2001; HAUK, 1999). Estas tensões são decorrentes do processamento e da história prévia do componente e são originadas sempre que o componente sofre deformação plástica localizada ou é sujeito a um gradiente de temperatura não-uniforme. Em geral as tensões residuais podem ser de:

Origens Mecânicas: As tensões residuais de origens mecânicas ocorrem devido à deformação plástica não-uniforme em alguma região do material, causada por um processamento mecânico.

Origens Térmicas: As tensões residuais de origens térmicas são resultantes da distribuição não-uniforme de temperatura numa dada região do componente. Esta distribuição pode ser produzida, por exemplo, pela variação não-uniforme de temperatura propriamente dita ou pela diferença nos coeficientes de expansão térmica entre fases adjacentes, as quais provocam a ocorrência de deformação plástica localizada em algumas regiões do componente durante um dado ciclo térmico (HAUK, 1999).

Origens Metalúrgicas: São as tensões residuais associadas às mudanças de volume decorrentes de reações químicas ou transformações de fase no material. Devido às diferenças entre as propriedades elásticas e cristalinas entre fases adjacentes, a menos que a transformação seja completamente homogênea, sempre teremos o desenvolvimento de tensões residuais na transformação de fase como consequência da dilatação volumétrica localizada (SCHAJER, 1994).

### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O conhecimento e quantificação dos fenômenos que ocorrem durante o processo de trefilação são de extrema importância para a estabilidade operacional, assim como para a qualidade final do produto. Assim sendo, buscou-se avaliar e quantificar o empenamento do produto barra recozida, trefilada e polida nas bitolas 12,5mm e 14,03mm ao longo do processo de trefilação.

#### 3.1 Matéria Prima

Barras acabadas de aço SAE 9254 com diâmetros de 12,50 e 14,03 mm e comprimento 3200mm foram obtidas por trefilação em máquina de trefila combinada. A tabela 3.1 mostra a faixa da composição química do material em questão conforme norma SAE.

Tab. 3.1 – Composição química do aço SAE 9254

Elemento Químico	C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe
% peso	0,52 - 0,58	1,2 - 1,4	0,6 - 0,8	0,025	0,015	0,6 - 0,8	em bal.

Antes de ser trefilado, o fio máquina passa por um tratamento térmico de recozimento. O ciclo deste tratamento térmico foi realizado em forno elétrico tipo campânula com atmosfera controlada por nitrogênio. Este ciclo corresponde a um patamar de 725°C por um período de 3 horas e após resfriamento controlado até 600°C. Basicamente, esta etapa ocorre para homogeneizar a estrutura perlítica do material.

Os resultados do produto laminado estão compatíveis com o processamento ao qual é submetido. O nível inclusionário é baixo e o tamanho de grão típico deste aço. A dureza é adequada para o produto laminado, bem como a estrutura ferítico-perlítica, a qual é apresentada na figura 3.1.

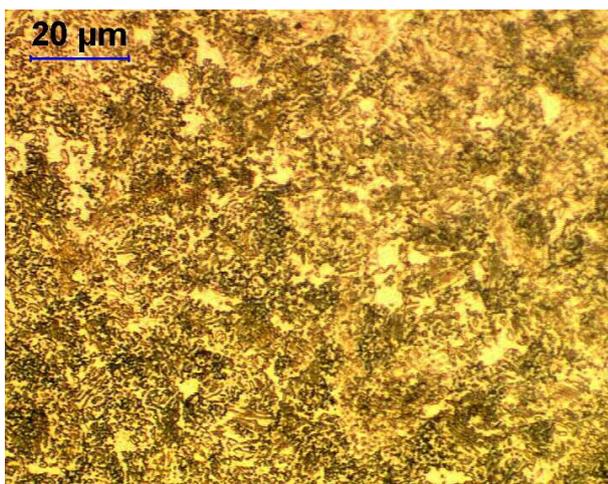


Fig. 3.1 – Microestrutura do produto laminado.

- Dureza: 225 HB
- Microestrutura: perlita e ferrita
- Microinclusões: ASTM E45 A1, 5F, D1, 0F
- Tamanho de grão: ASTM 6

### 3.2 Processo de Trefilação Combinada

O trabalho desenvolveu-se na máquina trefila combinada Schumag IV da Aços Especiais Piratini. Devido a sua complexidade e comprimento, podemos dividir esta máquina em estágios:

- abastecimento: é onde são colocados os rolos de fio máquina a fim de serem desbobinados (saírem da posição de bobina – enrolados - e passarem a fio–reto) e assim trefilados.

- pré-endireitamento: etapa onde o fio máquina sofre o primeiro alinhamento em relação à fieira. Nesta etapa, também ocorre a eliminação da carepa grosseira.

- decapagem mecânica (jato de granalha): etapa onde é eliminada a carepa residual proveniente do tratamento térmico.

- trefilação: é a etapa mais importante do processo porque é nela que ocorre a redução do material (barra) na fieira.

- corte: em tesoura hidráulica, o fio-máquina é cortado por cisalhamento a frio em barras múltiplas no comprimento especificado pelo cliente.

- estação de endireitamento: nesta etapa, em uma endireitadeira de duplo rolo ocorre o endireitamento e polimento da barra.

- estação de inspeção: com o auxílio de uma máquina de inspeção e prévia calibração da mesma, são detectados os defeitos superficiais do material com a finalidade de eliminar as barras que estiverem com defeitos acima do permitido. Esta definição de nível admissível de defeitos varia para cada cliente devido à especificação do mesmo.

- embalagem: última etapa do processo em linha. É onde são embaladas as barras em feixes com peso que variam de 1000 a 2500 kg.

Todos os estágios citados acima são em linha, ou seja, a etapa posterior depende da anterior.

Os parâmetros operacionais, reduções utilizadas, bem como as velocidades de trefilação empregadas, geometria de fieira, ângulo e pressão de endireitamento utilizadas nos testes são expressas na tabela 3.2. No pré-endireitamento (tabela 3.3) são apresentadas as posições dos rolos pré-endireitadores as quais correspondem as posições em milímetros em relação a linha tracejada na figura 2.7. Na etapa de jateamento, a corrente elétrica de passagem dos motores elétricos usados em cada jato é de 1,5 amperes. Utiliza-se nesta etapa a classe de esfera S170. Na trefilação, o material é tracionado a uma velocidade de 50 e 60 m/min. A fieira tem sua geometria caracterizada por um semi-ângulo de redução ( $\alpha$ ) de 7 e 10°, um comprimento do paralelo ( $L_p$ ) de 5 mm e um diâmetro ( $d_1$ ) de 20,1 mm, conforme figura 2.8. Na etapa de endireitamento com dois rolos, a pressão relativa suportada é de 10 e 20 amperes (medida de corrente que passa no motor da endireitadeira) e os ângulos superiores e inferiores utilizados são de 16,5°, 16,5° e 17,5°, 17,5°, respectivamente, conforme ilustrado na figura 2.17.

Tab. 3.2 – Parâmetros de processo utilizados nos experimentos

Variáveis de Processo	Parâmetros de Processo	
Bitola (mm)	12,5	14,03
Velocidade de Trefilação (m/min)	50	60
Semi ângulo $\alpha$ (°)	7	10
Redução do fio máquina (%)	14,3	21,9
Ângulo de Endireitamento (°)	16,5	17,5
Pressão de Endireitamento (A)	10	20

Tab. 3.3 – Parâmetros Pré-endireitamento

Pré-end.	
Pos. rolo 1	-1
Pos. rolo 2	1439
Pos. rolo 3	1967
Pos. rolo 4	2098
Pos. rolo 5	530
Pos. rolo 6	1669
Pos. rolo 7	2057
Pos. rolo 8	5090

### 3.3 Caracterização Metalúrgica

#### 3.3.1 Análise Química

A determinação da composição química foi realizada pelo emprego dos seguintes equipamentos:

- Espectrômetro de Emissão Óptica: ARL 3560
- Espectrômetro de Raios X: PHILIPS PW 2600
- Espectrofotômetro de Absorção Atômica: VARIAN AA 1475
- LECO: CS-444LS (para análise de C e S)
- LECO: TC-436 (para análise de N e O)

Uma amostra o material era apoiada sobre uma bancada, e após a calibração dos espectrômetros era feito a determinação da composição química.

#### 3.3.2 Ensaio de Dureza

Foi realizado ensaio de dureza Brinell em todas as amostras ensaiadas, no equipamento descrito a seguir:

- Durômetro: INSTRON Series 600
- Carga 187,5 Kg
- Esfera 2,5 mm

### 3.3.3 Caracterização microestrutural (microinclusões, microestrutura e tamanho de grão)

A preparação das amostras para estes ensaios consistiu no corte dos corpos de prova de 300 mm oriundos de barras do fio máquina, lixamento e polimento em pasta de diamante com granulometria 1  $\mu\text{m}$ .

Para a análise de microestrutura foi realizado ataque na superfície polida com reagente Nital 2%.

A análise de inclusões foi realizada conforme a norma ASTM E 45.

Já para a análise do tamanho de grão, foi empregado ataque Vilela e Nital 2% nas amostras previamente polidas. A caracterização foi conduzida conforme Norma ASTM E112.

As análises foram conduzidas no Microscópio Óptico Olympus BX 60.

As análises de microestrutura, inclusões e tamanho de grão foram realizadas na mesma região em todos os corpos de prova, correspondendo a meio raio, conforme é possível verificar na figura 3.2 esquemática abaixo.

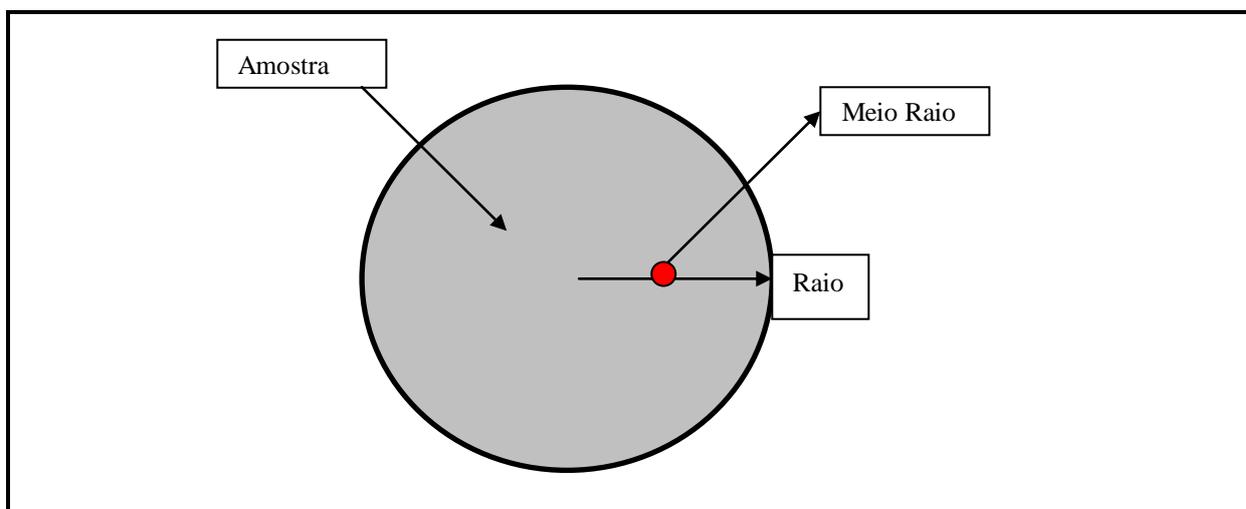


Fig. 3.2 – Esquema do local de medição da microestrutura, tamanho de grão e inclusões.

### 3.3.4 Ensaio de Tração

Para a análise da resistência a tração, tensão de escoamento e alongamento foi utilizado o equipamento da figura 3.3, com as características abaixo:

- Máquina de ensaios universais: INSTRON Series 4493

- Servo válvula com célula de carga com capacidade 60 ton.
- Controlador 8500 plus;
- Software Merlin.

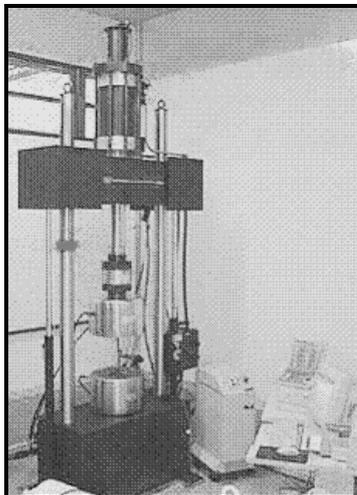


Fig. 3.3 – Máquina de Ensaio Universal

### 3.3.5 Avaliação do Empenamento

A medição do empenamento das barras foi realizada com auxílio de um relógio comparador marca Mitutoyo, conforme figura 3.4. A barra a ser medida era apoiada em uma mesa de suporte com 8 metros de comprimento onde cada suporte era separado por uma distância de 1 metro. Estes suportes eram compostos por polias que giravam em sentido anti-horário, permitindo assim a medição do empenamento com o auxílio de um relógio comparador previamente apoiado na barra.

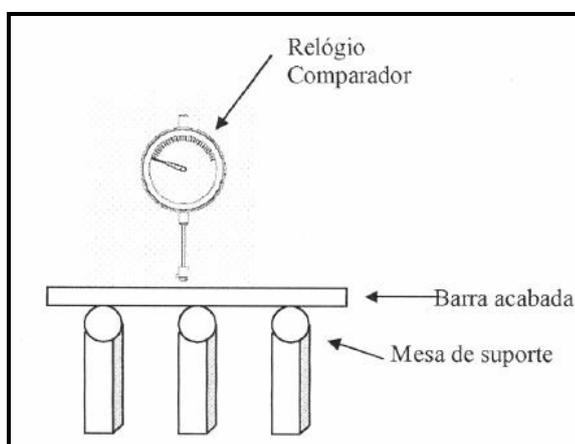


Fig. 3.4 – Medição do empenamento

### 3.4 Análise Estatística do Processo

Como o trabalho proposto objetiva uma melhoria da qualidade do processo, foi buscando ferramentas da qualidade de fácil acesso e aplicação rápida no chão de fábrica que objetivou-se quantificar o empenamento das barras ao final do processo e verificar as possíveis influências da velocidade de trefilação, geometria da fieira, pressão e ângulos de endireitamento na variabilidade do mesmo.

Para isto, a metodologia aplicada buscou ferramentas do sistema da qualidade. Aliado a diversos trabalhos anteriores desenvolvidos na Gerdau, foi considerado importante ter como foco a estabilização de processos, principalmente a variável empenamento, ou seja, a variável resposta para os testes que estavam sendo propostos seria o empenamento. Além disto, também buscava-se comprovar uma redução da variabilidade do empenamento por métodos estatísticos, utilizando-se para isto a medida do desvio-padrão da análise. Isto porque o empenamento tinha uma variabilidade muito grande no processo de trefilação onde era medido o mesmo. Isto pode ser comprovado pela figura 3.5. O limite máximo especificado pelo cliente para o empenamento era de 1,5 mm/m, o qual muitas vezes era excedido, chegando ao cliente lotes contendo barras empenadas juntamente com barras dentro do limite especificado, ou seja, por mais que se aumentassem as medições de empenamento da barras no final do processo de trefilação, devido à variabilidade, havia o risco de reclamação. Pode-se citar que era impossível, por questões de produtividade, colocar no processo medição de 100% das barras.

Foram utilizadas algumas ferramentas do Seis Sigma (MOREIRA, 2004; AGUIAR, 2002) a fim de seguir um modelo de estabilização do processo. A proposta pode ser dividida em quatro etapas em analogia com o ciclo do PDCA proposto por Deming (DEMING, 1990): planejamento (*Plan*), execução (*Do*), avaliação (*Check*), correções e melhorias (*Act*).

Para uma melhor avaliação do PDCA, foram utilizadas as ferramentas estatísticas CEP (controle estatístico do processo), cartas de controle, histogramas e diagramas de Pareto.

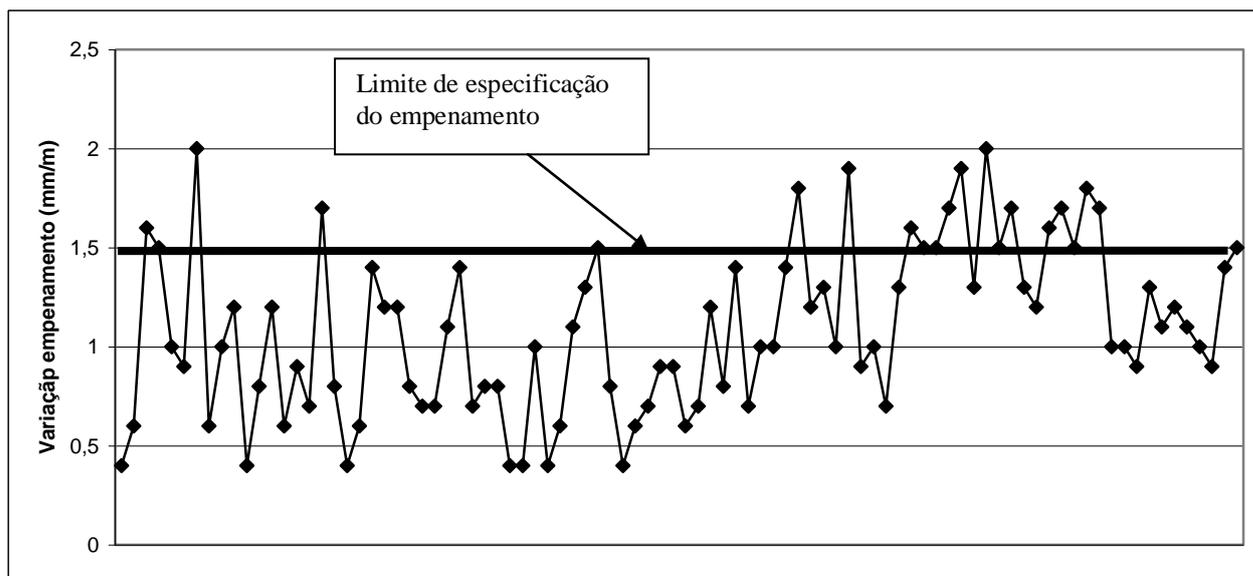


Fig. 3.5 – Variação do empenamento em barras bitola 12,5 e 14,03 mm no início do trabalho

### 3.4.1 Etapa 1: Planejamento

Nesta fase foram compreendidas as etapas de definição do escopo do projeto, definição dos itens de controle e metas. Também na etapa do planejamento foram decididos os pontos de coleta das amostras para os ensaios de dureza, micrografias e medição de empenamento. Na figura 3.6 consegue-se observar os pontos onde foram coletadas as amostras ao longo da trefila combinada nas etapas identificadas por I, II e III.

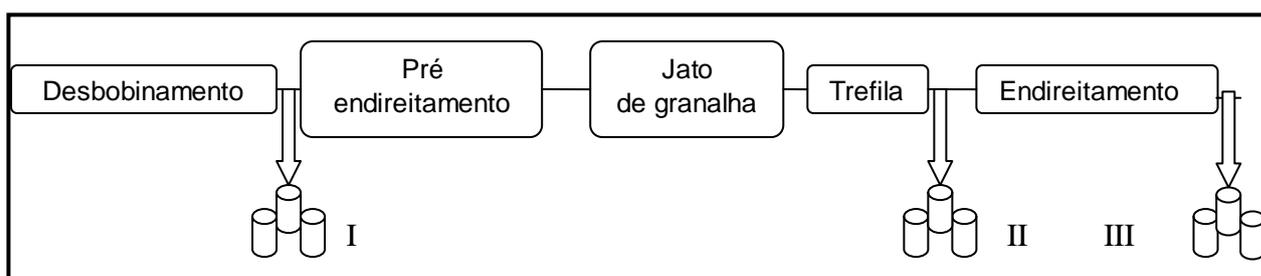


Fig. 3.6 – Processo de trefila combinada e pontos de retirada de amostras

Na etapa I foram retiradas amostras de 300 mm da ponta do fio-máquina após desbobinamento, para ensaios mecânicos e micrográficos.

Na etapa II foram retiradas amostras de 300 mm do início, meio e final de rolo após a trefila com auxílio da tesoura hidráulica de corte durante o seccionamento de barras nos seus múltiplos. Com a mesma finalidade da etapa I, as amostras são para ensaios mecânicos e micrográficos.

Na etapa III, após o endireitamento, na condição final de entrega do material, foram retiradas amostras de 300 mm para análise de ensaios mecânicos e micrografias. Ao todo foram inspecionadas 520 amostras.

#### Definição do Escopo, Itens de Controle e Metas

Na etapa inicial da metodologia identificou-se um processo com resultados indesejáveis (empenamento da barra), levando-se em conta: a qualidade (reclamação de cliente ou sucateamento do material), custo (reprocesso de material em outra endireitadeira introduzindo assim outra operação no processo), atraso no prazo de entrega (afetado pelo material ficar bloqueado até análise e ou reprocesso) e segurança (movimentação de material via ponte rolante em toda a área). Portanto, o descontentamento do cliente externo e interno era imenso devido a estes resultados indesejados citados. Além disto, o aparecimento do empenamento em excesso pode acarretar diversos problemas no material (produto final do cliente) como formação de trincas, falta de estabilidade dimensional e dificuldade no ajuste de peças ou componentes devido a sua mudança de forma, impossibilitando o mesmo de ser produzido.

A fim de melhorar os resultados, foram definidos itens de controle ou indicadores (IC's), que são características mensuráveis por meio das quais um processo é gerenciado<sup>61-63</sup>. Estes IC's mostram ao longo de um determinado tempo a variação do processo.

Werkema (WERKEMA, 1995) diz que um processo é gerenciado por meio de seus itens de controle, os quais devem ser acompanhados periodicamente para que seja possível detectar eventuais resultados indesejáveis do processo. O item de controle definido foi reclamação de cliente por defeito tipo empenamento e, para avaliar o mesmo, obteve-se um histórico das reclamações recebidas de clientes deste processo como apresentado na figura 3.7. A meta para o item de controle definido é a redução a zero, ou seja, não ter reclamação por motivo empenamento em barras. Além deste item de controle, a especificação de empenamento máximo do cliente era de 1,5 mm/m, ou seja, dentro da análise da carta de controle qualquer barra que estivesse acima deste valor deveria sofrer reprocesso ou ser sucutada e todo o lote em questão estaria sob suspeita.

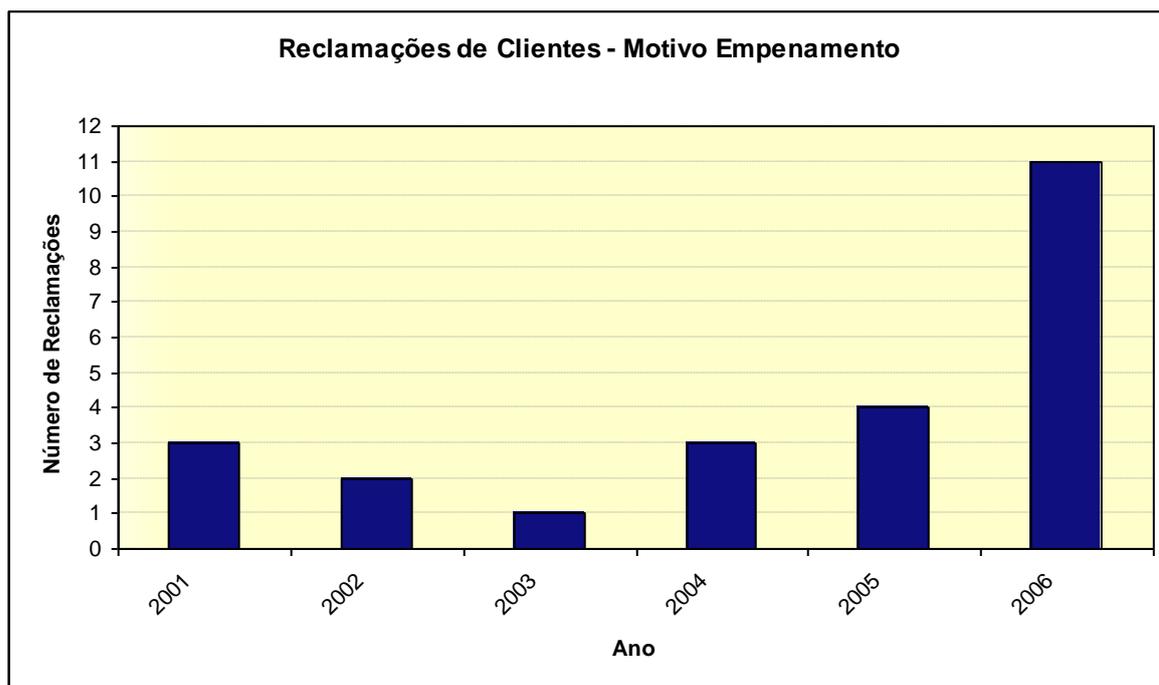


Fig. 3.7 – Histórico das reclamações de clientes por motivo empenamento

### Montagem do Fluxo de Processo Crítico

Após definir o item de controle crítico relativo ao processo de trefilação, o empenamento, foi elaborado a montagem do fluxo de processo crítico bem como a análise criteriosa do processo e coleta de dados. As variáveis envolvidas e o resultado de cada etapa estão ilustrados na figura 3.8 através da ferramenta mapa de processo (MONTGOMERY, 1990). Abaixo de cada caixa listada do fluxo estão as variáveis envolvidas. Aquelas identificadas com a letra “c” podem ser controladas ao longo do processo através de ajustes ou receitas do equipamento. As variáveis identificadas com a letra “r” são ruídos do processo e não podem ser controlados naquela etapa, sendo que os itens indicados com asterisco são críticos para cada etapa. Acima de cada caixa estão listadas as características de produto resultantes, sendo aquelas identificadas pela letra Y características finais do produto, ou seja, não serão modificadas após esta etapa. Aquelas representadas pela letra y podem ser modificadas. Neste mapeamento prévio são indicadas as variáveis que devem ser alvo de estudos para um entendimento aprofundado do processo.

Foi elaborado o mapa de processo da trefila onde o mesmo apontou alguns pontos onde a variável empenamento poderia estar envolvida. Este fluxo do processo contempla a seqüência de etapas do processo ou atividades que permitem produzir ou obter o resultado desejado.

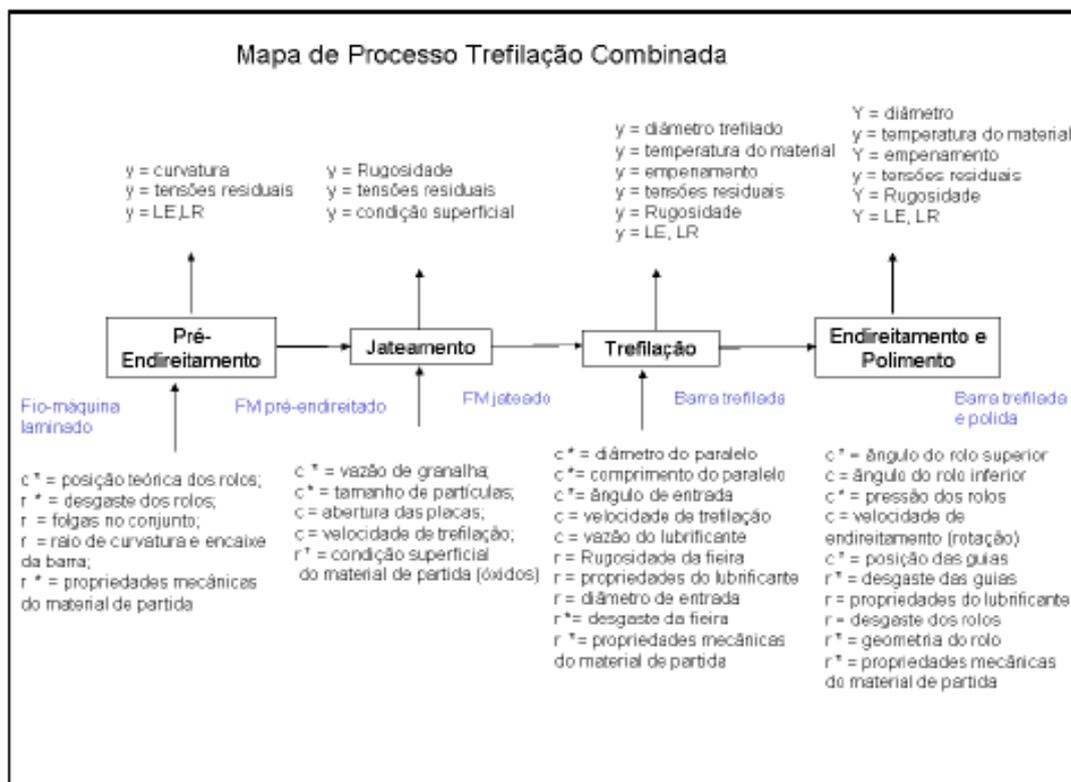


Fig. 3.8 - Fluxograma do processo e variáveis envolvidas

### Análise do Processo

Após terem sido claramente definidas as atividades do processo crítico, foi importante estabelecer onde a variável empenamento poderia ser afetada ao longo do processo. Além disto, definir uma matriz para coleta dos dados.

Seguindo as etapas, as variáveis críticas do processo foram definidas (velocidade de trefilação, ângulo e pressão dos rolos de endireitamento e geometria da fiara) e optou-se por utilizar a ferramenta estatística *Design of Experiments* (DOE) (MONTGOMERY, 1990; MONTGOMERY, 1997) para realização dos ensaios. Esta definição e escolha das variáveis críticas deram-se a partir da literatura, como anteriormente comentado. A metodologia do DOE determina a relação entre fatores e suas interações que afetam o processo e os resultados do mesmo. O método tradicional de coletar grandes quantidades de dados mudando um dos parâmetros torna-se impossível pelo número de fatores que podem vir a influenciar no processo. Um modelo mais eficiente é o de fatorial em dois níveis para cada fator, assim o número de experimentos é reduzido (MONTGOMERY, 1990; KESSLER, 2006).

Quatro fatores foram considerados no DOE: velocidade de trefilação, semi-ângulo da fiara, pressão de endireitamento e ângulo de endireitamento. Os experimentos foram

realizados utilizando uma matriz  $2^2$  para cada uma das variáveis. Em apenas um momento foram avaliadas três variáveis (semi ângulo de fieira, ângulo e pressão de endireitamento) ao mesmo tempo. Também foi avaliada cada uma das variáveis em separado a partir da condição padrão do processo de trefilação para o aço SAE 9254, o qual estava sendo utilizado. Esta condição padrão pode ser verificada na tabela 3.4. As reduções utilizadas podem ser visualizadas na tabela 3.5, onde a bitola inicial é a bitola de laminação e a final é após trefila e endireitamento.

Tab. 3.4 – Parâmetros de processo padrão utilizados na trefilação de aço SAE 9254

Velocidade de Trefilação (m/s)	60
Semi-ângulo de fieira (°)	10
Pressão de Endireitamento (A)	20
Ângulo superior de endireitamento (°)	17,5
Ângulo inferior de endireitamento (°)	17,5

Tab. 3.5 – Reduções utilizadas no processo de trefilação do aço SAE 9254

Bitola inicial	Bitola final	% Redução
15,88	14,03	21,9
13,5	12,5	14,3

### Caracterização da Fieira

A geometria da fieira foi obtida com auxílio do equipamento SCOB (torno de precisão), onde com o mesmo foi possível produzir fieiras com o perfil desejado para os experimentos. Este perfil foi medido com instrumento de precisão (medidor de perfil) marca Taylor Hobson™.

Para cada uma das bitolas foram utilizadas fieiras angulares com geometrias diferentes assim definidas e caracterizadas. A fieira identificada como X037 foi utilizada para bitola de 12,5 mm, enquanto que a fieira identificada como X419 foi utilizada para bitola de 14,03 mm.

Conforme bibliografia citada anteriormente buscou-se trabalhar com um semi-ângulo de fieira maior ( $\alpha = 10^\circ$ ) e outro semi-ângulo de fieira menor ( $\alpha = 7^\circ$ ) a fim de verificar a influência no empenamento.

### Determinação da Velocidade de Trefilação

A padronização do processo (anterior ao trabalho) indicava uma velocidade padrão de 60 m/min para trefilação de aço mola independente da bitola a ser processada. Foram definidas as velocidades para o experimento: 50 m/min e 60 m/min.

A velocidade de trefilação foi medida pelo próprio software da trefila combinada Schumag IV e indicado no monitor para controle da operação. A figura 3.9 indica a medição em destaque de preto.

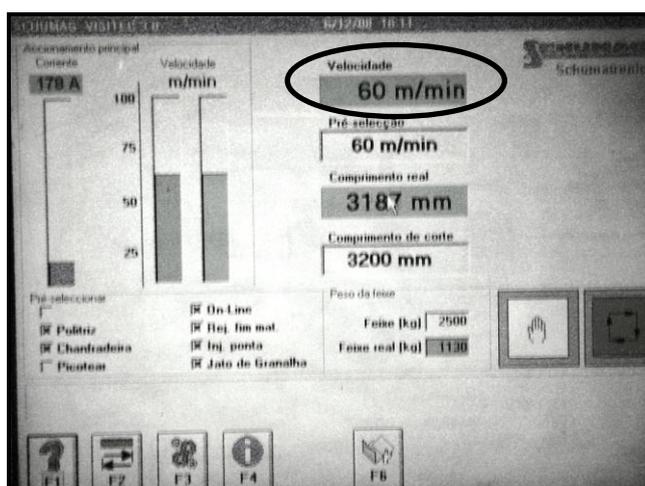


Fig. 3.9 – Monitor de controle da velocidade de trefilação

### Determinação dos Ângulos e Pressão de Endireitamento

A endireitadeira utilizada foi de duplo rolo que era composta por rolos hiperbólicos, um côncavo e outro convexo, como pode ser visualizado na Figura 3.10.



Fig. 3.10 – Rolos de endireitamento

Foi definido em relação a padronização do processo existente que os experimentos seriam realizados com ângulos tanto do rolo superior quanto inferior com  $16,5^\circ$  e que a pressão seria 10A. A padronização indicava ângulo dos rolos superior e inferior de  $17,5^\circ$  e pressão de 20 A. A medida de A (Ampere) é expressa pelo equipamento e mede a potência da pressão de endireitamento. É a corrente do motor da endireitadeira que é proporcional a potência e, portanto, a uma maior pressão maior a amperagem. Estes parâmetros foram definidos através de sugestões de especialistas na área de endireitamento, bem como a padronização veio do fabricante do equipamento.

### 3.4.2 Etapa 2: Execução

Foram realizados os experimentos alinhados ao planejado, interpolando as variáveis críticas propostas: velocidade de trefilação (50 e 60 m/min), geometria de fieira (semi-ângulo  $\alpha = 7$  e  $10^\circ$ ), ângulo superior e inferior dos rolos de endireitamento ( $16,5$  e  $17,5^\circ$ ) e pressão dos rolos de endireitamento (10 e 20A). Os testes seguiram a tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Matriz da execução dos testes

Bitola (mm)	12,5					14,03				
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8	Teste 9	Teste 10
Velocidade de Trefilação (m/min)	60	50	60	60	50	60	60	50	50	50
Semi ângulo $\alpha$ ( $^\circ$ )	10	10	7	7	7	10	7	10	7	10
Ângulo de Endireitamento ( $^\circ$ )	17,5	17,5	17,5	16,5	16,5	17,5	17,5	16,5	16,5	17,5
Pressão de Endireitamento (A)	20	20	20	20	10	20	20	10	20	20

Como os resultados dos testes eram analisados no momento da aquisição, cada novo teste era realizado com os melhores parâmetros que haviam sido alcançados até o momento. Isto reduziu grandemente o número de testes, não necessitando serem efetuados todos os testes propostos.

### 3.4.3 Etapa 3: Avaliação

A avaliação consiste na medição do empenamento ao final do processo, ou seja, após a etapa de endireitamento. Nesta etapa, era realizado o acompanhamento dos dados coletados nos pontos pré-estabelecidos e confrontados os mesmos com padrões existentes (limite de empenamento admissível). A determinação da frequência e tamanho da amostragem para medição foi de 30 amostras por Ordem de Produção (OP), ou seja, a cada ordem de produção

era mensurado o empenamento de 30 barras aleatoriamente. Também foi levado em consideração que amostragens maiores permitem detectar pequenas mudanças no processo, por isto não foi realizado uma maior amostragem. As medições de empenamento eram disponibilizadas em cartas de controle, onde o próprio operador do processo – devidamente capacitado - era apto a fazer o acompanhamento e as intervenções no processo dentro dos parâmetros pré-estabelecidos, caso fosse encontrada alguma divergência do empenamento medido.

A amostragem das barras acabadas foi realizada aleatoriamente e a medição foi realizada conforme descrito no item 3.5.1.

#### 3.4.4 Etapa 4: Correções e Melhorias

Foi a última etapa utilizada ao longo do trabalho. Consiste em uma sistemática de melhoramento contínuo do processo, ou seja, todas as melhorias e conclusões do trabalho foram implementadas nesta etapa dentro da metodologia proposta.

As padronizações do processo para o aço SAE 9254 e treinamentos dos operadores necessários foram realizados para evitar variações no processo e permitir o atendimento das especificações do cliente.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, são apresentados os resultados obtidos nos testes realizados no processo de trefilação. Os dados obtidos nos diferentes experimentos foram alimentados em software Mini Tab para processamento e consulta estatística. Os gráficos foram elaborados em software Excel e Mini Tab.

### 4.1 Resultados do Empenamento no Processo Padrão

A figura 4.1 apresenta o resultado da medição de empenamento realizada no processo padrão (testes 1 e 6 da tabela 4.1) para as bitolas 12,5 e 14,03 mm. Referente a bitola 12,5 mm (teste 1), o empenamento varia na faixa entre 0,4 e 2,0 mm (máximo e mínimo respectivamente), tendo um valor médio de 1,1mm. Na bitola 14,03mm (teste 6), o empenamento varia na faixa entre 0,2 a 2,0 mm e tem um valor médio de empenamento de 1,0 mm, ou seja, se levássemos em conta apenas o empenamento médio, os lotes medidos estariam dentro das especificações do cliente, mas analisando a variabilidade, nota-se uma grande distorção nos resultados impactando na especificação do material.

Tab. 4.1 – Matriz da execução dos testes

Bitola (mm)	12,5					14,03				
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8	Teste 9	Teste 10
Velocidade de Trefilação (m/min)	60	50	60	60	50	60	60	50	50	50
Semi ângulo $\alpha$ (°)	10	10	7	7	7	10	7	10	7	10
Ângulo de Endireitamento (°)	17,5	17,5	17,5	16,5	16,5	17,5	17,5	16,5	16,5	17,5
Pressão de Endireitamento (A)	20	20	20	20	10	20	20	10	20	20

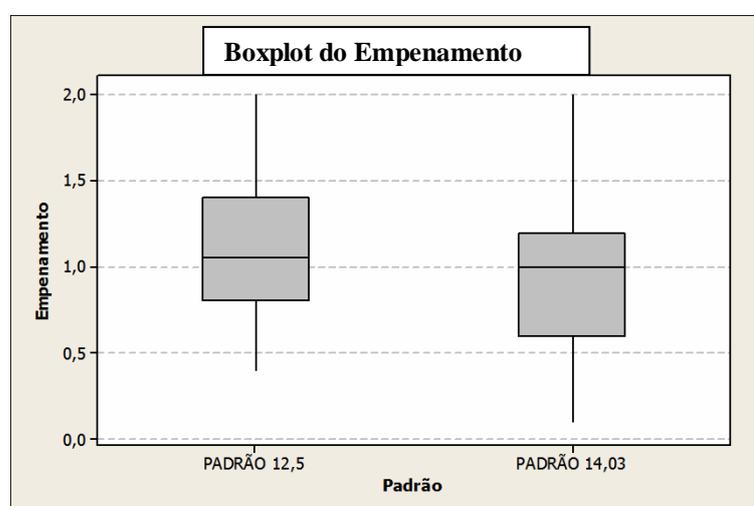


Fig. 4.1 – Resultado da medição de empenamento no processo padrão

## 4.2 Microestrutura, Micro inclusões e Tamanho de Grão

As figuras 4.2 a 4.7 apresentam as microestruturas representativas após a etapa de redução na fieira e após endireitamento para as condições de processo pré definidas.

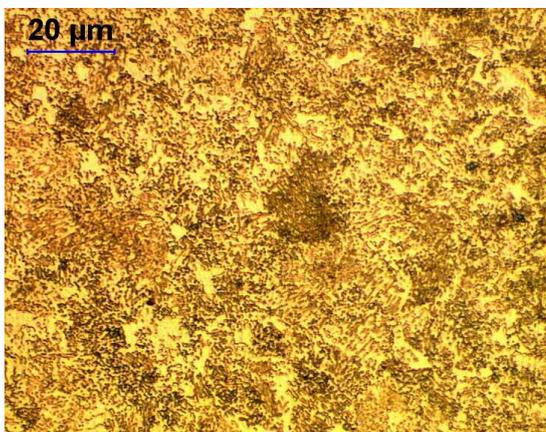


Fig. 4.2 – Microestrutura após redução na fieira teste 1

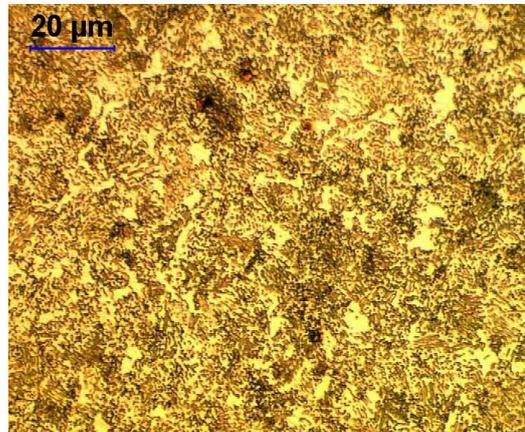


Fig. 4.3 – Microestrutura após endireitamento teste 1

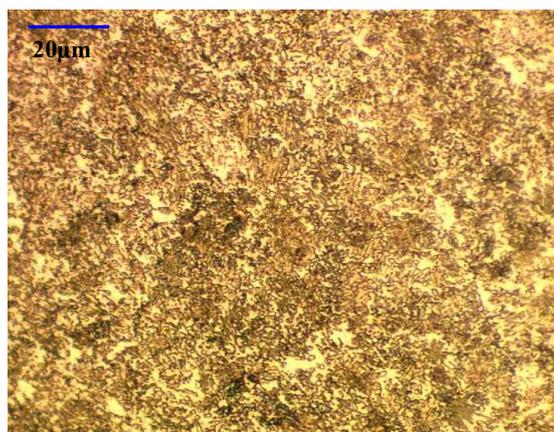


Fig. 4.4 – Microestrutura após redução na fieira teste 5

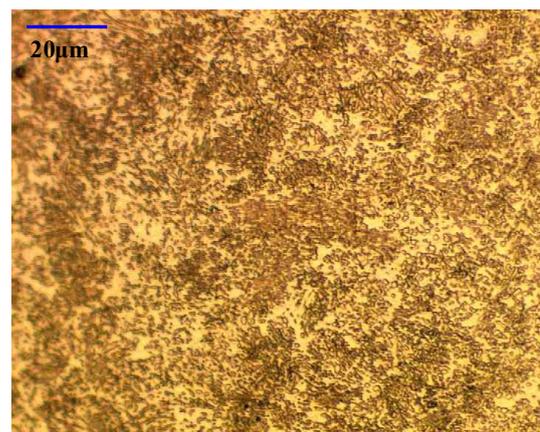


Fig. 4.5 – Microestrutura após endireitamento teste 5

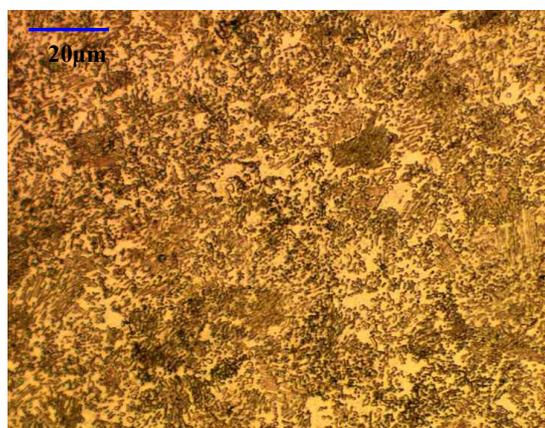


Fig. 4.6 – Microestrutura após redução na fieira teste 6

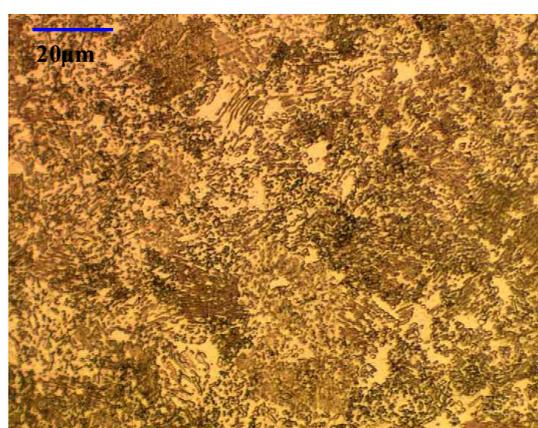


Fig. 4.7 – Microestrutura após endireitamento teste 7

As figuras 4.8 a 4.10 apresentam as microinclusões representativas após a etapa de laminação, redução na fieira e após endireitamento para as condições de processo pré definidas. As figuras 4.11 a 4.13 apresentam a microestrutura do material donde se obtém o tamanho de grão após a etapa de laminação, redução na fieira e após endireitamento para as condições de processo pré definidas.

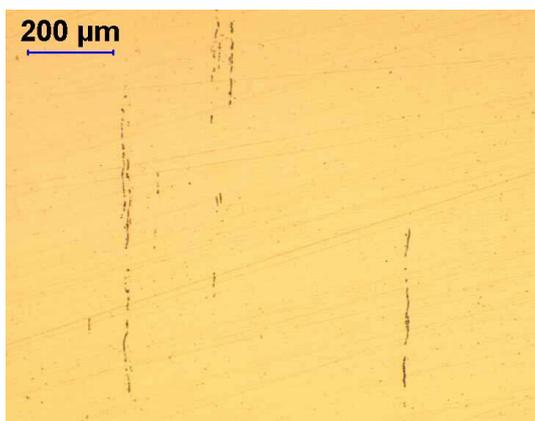


Fig.4.8 – Microinclusões amostra laminado bruto

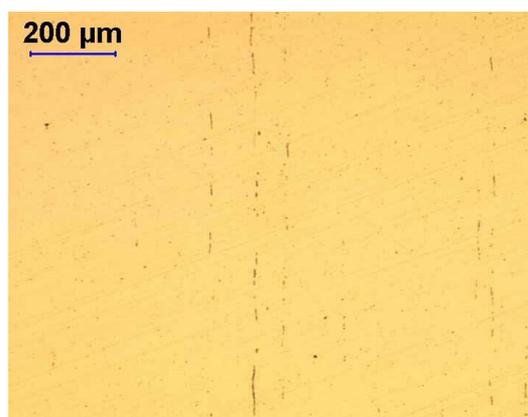


Fig. 4.9 – Microinclusões após redução na fieira

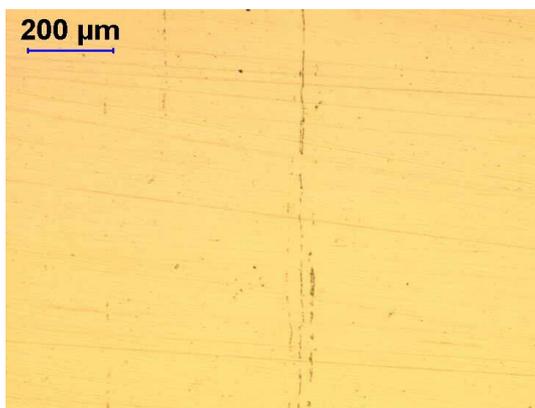


Fig. 4.10 – Microinclusões após endireitamento

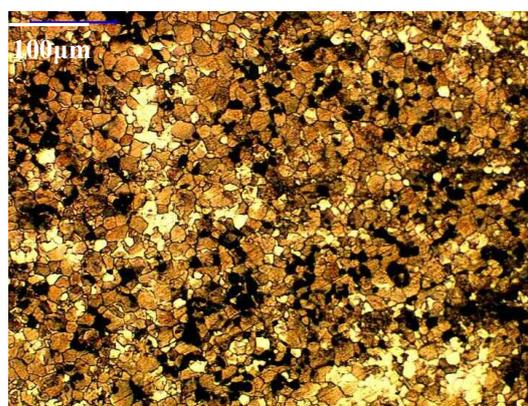


Fig. 4.11 – Microestrutura material laminado bruto

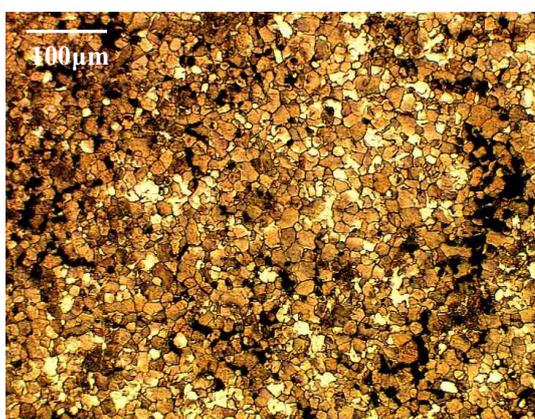


Fig.4.12 – Microestrutura material após fieira

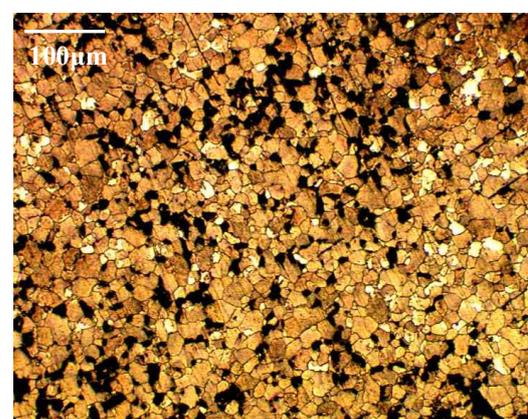


Fig.4.13 – Microestrutura material após endireitamento

Pela análise das micrografias após as etapas de trefilação na fieira e endireitamento, não foi possível verificar nenhuma alteração drástica da microestrutura que viesse a causar uma distorção na barra. Embora Sun et al (SUN, 2001) comentarem que há um alinhamento da estrutura do material ao fluxo do processo, este alinhamento não foi comprovado, talvez pela redução a que a barra foi submetida. A análise das microinclusões nos mostra que não há variação entre as amostras, ou seja, as partículas microinclusionárias presentes no material desde a etapa inicial de fabricação não apresentam mudanças, mas não quer dizer que a analogia de que as mesmas não interferem no empenamento seja verdadeira. Isto porque quanto mais inclusões e, dependendo do alinhamento das mesmas, teremos uma maior distorção no retículo cristalino surgindo então o empenamento. Em relação ao tamanho de grão, também não foi notado diferenças após os processos que a barra foi submetida, permanecendo o tamanho de grão entre ASTM 7 a 8. Se tivéssemos um maior grau de redução, seria maior a redução do tamanho de grão além de haver a fragmentação das lamelas de cementita, cisalhando as colônias de perlita e introduzindo uma maior deformação no processo.

Em relação às variáveis do processo utilizadas, não foi notada nenhuma influência das mesmas nas micrografias, apenas ocorrendo a influência do processo de trefilação como citado anteriormente.

### 4.3 Dureza

A tabela 4.2 apresenta os resultados da dureza média das amostras laminadas, após redução na fieira e após o endireitamento (testes 5 e 8 da tabela 4.3).

Tab. 4.2 – Resultado de dureza ao longo do processo de trefilação

D u r e z a	Bitola (mm)	12,5	14,03
	Laminado (HB)	225	225
	Após redução fieira (HB)	292	294
	Após endireitamento (HB)	279	281

Tab. 4.3 – Matriz de execução dos testes

Bitola (mm)	12,5				14,03					
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8	Teste 9	Teste 10
Velocidade de Trefilação (m/min)	60	50	60	60	50	60	60	50	50	50
Semi ângulo $\alpha$ (°)	10	10	7	7	7	10	7	10	7	10
Ângulo de Endireitamento (°)	17,5	17,5	17,5	16,5	16,5	17,5	17,5	16,5	16,5	17,5
Pressão de Endireitamento (A)	20	20	20	20	10	20	20	10	20	20

Com já era esperado, ocorre aumento da dureza a partir da redução na fieira devido ao encruamento que o material sofre durante a redução de área a que é submetido. Para avaliar a influência da variação do semi-ângulo da fieira na dureza, foram comparados os resultados de dureza nos testes 5 e 8. A tabela 4.4 apresenta o resultado deste experimento. Na propriedade dureza, também não foi constatada influência das variáveis do processo testadas.

Tab. 4.4 – Resultado da variação de dureza em relação ao semi-ângulo da fieira

		TESTE 5	TESTE 8
D u r e z a	Bitola (mm)	12,5	14,03
	Laminado (HB)	225	225
	Após redução fieira (HB)	290	289
	Após endireitamento (HB)	281	282

#### 4.4 Propriedades Mecânicas

As tabelas 4.5, 4.6 e 4.7 apresentam os resultados dos testes 1 e 9 avaliando as propriedades mecânicas do material (resistência a tração, limite de escoamento e alongamento).

Tab. 4.5 – Resultado da resistência a tração do material ao longo do processo de trefilação

		TESTE 1	TESTE 9
Resis. Tração (MPa)	Bitola (mm)	12,5	14,03
	Laminado	788	792
	Após redução fieira	943	944
	Após endireitamento	930	931

Tab. 4.6 – Resultado do limite de escoamento do material ao longo do processo de trefilação

Limit. Escoamento (MPa)		TESTE 1	TESTE 9
	Bitola (mm)	12,5	14,03
	Laminado	385	387
	Após redução fieira	776	777
	Após endireitamento	760	762

Tab. 4.7 – Resultado do alongamento do material ao longo do processo de trefilação

Alongamento (%)		TESTE 1	TESTE 9
	Bitola (mm)	12,5	14,03
	Laminado	25	25
	Após redução fieira	13	12
	Após endireitamento	13	13

É possível verificar que após a redução que o material sofre na fieira ocorre um aumento na resistência a tração e no limite de escoamento do material e a redução do alongamento. Estes resultados já eram esperados, assim como o aumento da dureza comentado anteriormente. A figura 2.5 (BOYER, 2002) apresentada na literatura mostra que um dos objetivos do processo de trefilação é atribuir aos materiais propriedades que o mesmo não possuía antes e entre elas está o aumento da resistência a tração e o limite de escoamento. Os resultados encontrados para ambas as bitolas concordam com a literatura, mas não podemos relacionar ao aumento da variabilidade do empenamento. A fim de verificar esta afirmação, foi realizado um comparativo entre os testes 1 (padrão 12,5 mm) e 9 (conforme tabela 4.8), analisando as variáveis: velocidade de trefilação, semi-ângulo de fieira e ângulos dos rolos de endireitamento diferentes. As figuras 4.14 e 4.15 apresentam os resultados deste experimento em forma de gráfico *boxplot* e histograma, mostrando a variabilidade do empenamento no processo.

Tab. 4.8 – Matriz de execução dos testes

Bitola (mm)	12,5					14,03				
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8	Teste 9	Teste 10
Velocidade de Trefilação (m/min)	60	50	60	60	50	60	60	50	50	50
Semi ângulo $\alpha$ (°)	10	10	7	7	7	10	7	10	7	10
Ângulo de Endireitamento (°)	17,5	17,5	17,5	16,5	16,5	17,5	17,5	16,5	16,5	17,5
Pressão de Endireitamento (A)	20	20	20	20	10	20	20	10	20	20

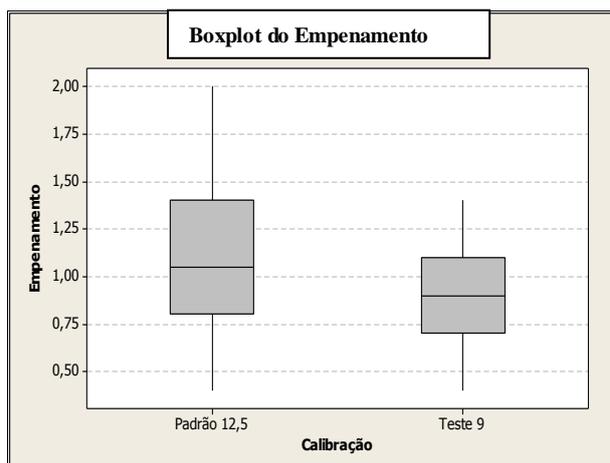


Fig. 4.14 - Variação do empenamento em relação a influência da velocidade de trefilação, semi-ângulo de fieira e ângulos dos rolos de endireitamento.

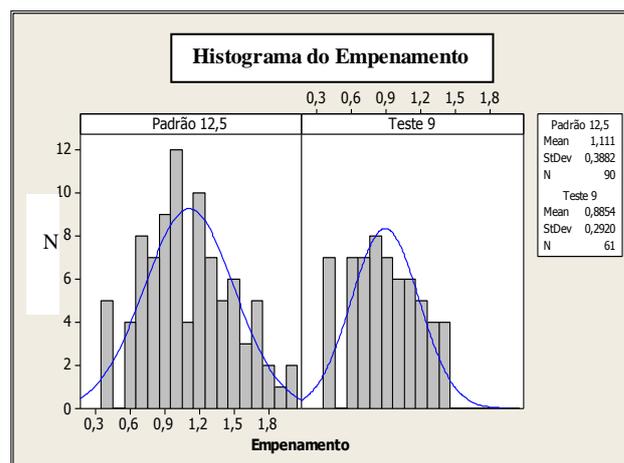


Fig. 4.15 - Histograma da variação do empenamento em relação a influência da velocidade de trefilação, semi-ângulo de fieira e ângulos dos rolos de endireitamento.

Apesar dos resultados apresentarem uma redução da variabilidade do empenamento entre os testes 1 e 9, não podemos concluir que isto é resultado de uma influência das propriedades mecânicas na variabilidade do empenamento. Isto porque a variação das propriedades apresentadas nas tabelas 4.5 a 4.7 entre os testes 1 e 9 é muito pequena após todas as etapas de medição. Por outro lado, o conhecimento técnico do processo nos mostra que há uma grande variação destas propriedades (principalmente na tensão de escoamento) na matéria prima base, poderá haver influência no empenamento. Tendo em vista que todo o ajuste da máquina de trefila combinada é realizada em cima dos parâmetros do material base, ou seja, diferenças que não são medidas na entrada onde se supõem que estejam corretas, têm como consequência uma distorção no resultado do processo final. Por isto, cada ordem de produção tem o valor de escoamento e dureza do material.

A redução do limite de escoamento após endireitamento pode ser causado pelo amolecimento gerado pela deformação cíclica. Este fenômeno é conhecido como efeito Bauschinger. Neste fenômeno, nota-se que as tensões de escoamento de alguns materiais são menores após a aplicação de tensões de sinal contrário, causando uma histerese devido ao deslocamento e movimentação de discordância e barreiras na estrutura cristalina (CHEN, 1999).

#### 4.5 Velocidade de Trefilação

Nakagiri et al (NAKAGIRI, 2001) citam que uma das condições do processo que influencia nas condições finais dos produtos trefilados, entre elas o empenamento, é a velocidade de trefilação. Com o aumento da velocidade de trefilação observa-se um incremento na variável empenamento. A figura 4.16 apresenta os resultados dos testes 1 e 2 para a bitola 12,5mm e os testes 6 e 10 para a bitola 14,03mm (conforme tabela 4.9). A relação entre velocidade e empenamento aparece claramente quando o fio-máquina é trefilado a uma velocidade padrão de 60 m/min, o empenamento médio situa-se na faixa de 1 a 1,3 mm/m, enquanto que reduzindo a velocidade de trefilação para 50 m/min, há a redução do empenamento médio para aproximadamente 0,7 mm/m. Este aumento do empenamento diretamente proporcional ao aumento da velocidade de trefilação já foi citado na literatura (NAKAGIRI, 2001). Quanto menor a velocidade, maior o tempo de contato entre a feira e a barra. Neste pequeno intervalo de tempo, ocorre uma maior e melhor distribuição do estado de tensões em todo o material, favorecendo a deformação mais homogênea do material.

Se observarmos, a média do empenamento em nenhum dos casos ultrapassa o limite máximo estipulado pelo cliente, mas se somado as outras variáveis do processo, a velocidade de trefilação influencia no aumento da variabilidade do empenamento.

Tab. 4.9 – Matriz de execução dos testes

Bitola (mm)	12,5					14,03				
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8	Teste 9	Teste 10
Velocidade de Trefilação (m/min)	60	50	60	60	50	60	60	50	50	50
Semi ângulo $\alpha$ (°)	10	10	7	7	7	10	7	10	7	10
Ângulo de Endreitamento (°)	17,5	17,5	17,5	16,5	16,5	17,5	17,5	16,5	16,5	17,5
Pressão de Endreitamento (A)	20	20	20	20	10	20	20	10	20	20

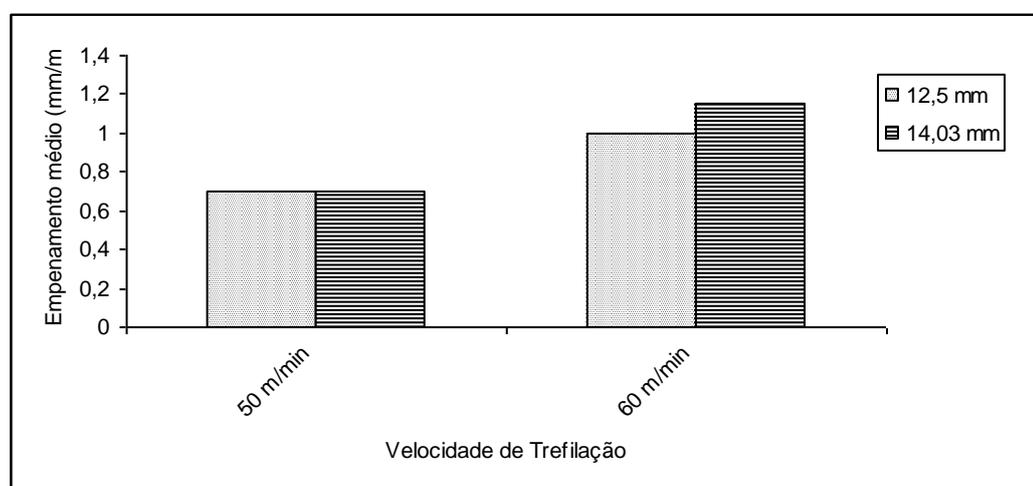


Fig. 4.16 - Variação do empenamento com aumento da velocidade de Trefilação

#### 4.6 Geometria da Fieira

Nakagiri e Shemenski (NAKAGIRI, 2001; SHEMENSKI, 1999) simularam por elementos finitos as tensões envolvidas durante a trefilação e encontraram que na região de redução, nos pontos próximos a superfície, existiam tensões compressivas que ultrapassam o limite elástico causando tensões trativas elásticas no núcleo. Após a passagem pelo cone paralelo, em função da deformação plástica na superfície, as tensões trativas no centro são aliviadas, gerando, no equilíbrio, tensões trativas residuais na superfície do material. A figura 4.17 ilustra as tensões e deformações envolvidas.

É sabido que a zona de deformação, na qual ocorrem as deformações plásticas, exerce forte influência sobre o estado de tensões residuais final (WANG, 2002). Nesta região, temos a influência do parâmetro  $\Delta$ , citado na equação 2.1, o qual para o caso estudado é de 4 (na média para as duas bitolas envolvidas), valor bastante similar se comparado com aqueles sugeridos pela literatura (WRIGHT,1979). Este valor indica o aumento do trabalho redundante e, ao mesmo tempo, uma redução na força de atrito em função da menor área de contato.

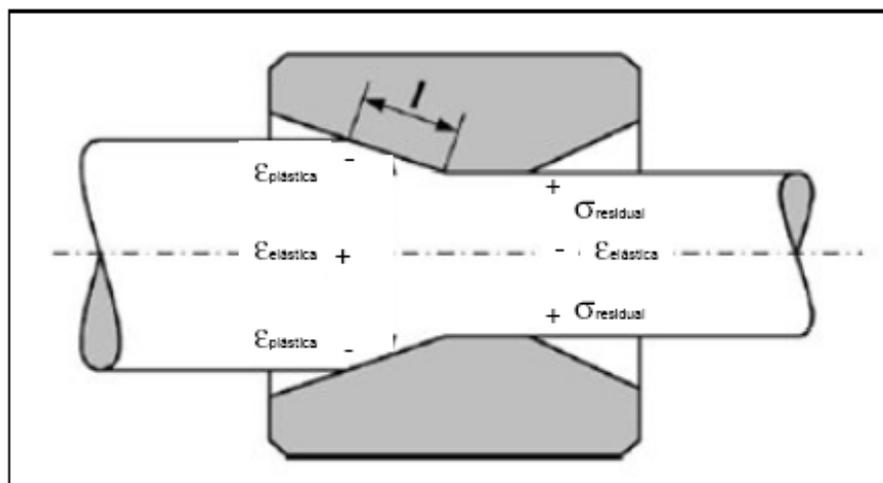


Fig. 4.17– Ilustração das tensões e deformações no processo de trefilação<sup>5</sup>

A influência do semi-ângulo da fieira no empenamento foi verificado variando-se a geometria da fieira, ou seja, foi utilizado uma fieira com semi-ângulo  $\alpha = 7^\circ$  e outra fieira com  $\alpha = 10^\circ$ . A figura 4.18 apresenta os resultados dos testes 1 e 3 para a bitola 12,05mm e dos testes 6 e 7, para a bitola 14,03mm (conforme a tabela 4.10). A amostragem foi realizada em uma mesma ordem de produção (10 ton), onde na metade da ordem de produção foi alterada a

fieira. Pela relação de Avitzur (AVITZUR, 1974), verifica-se que há um ângulo de fieira ótimo que influenciaria na tensão de trefilação. Nota-se claramente a variabilidade e aumento do empenamento médio quando é trocada a fieira( de  $\alpha = 7^\circ$  para  $\alpha = 10^\circ$ ), o que converge exatamente para o que Nakagiri e Asakawa (NAKAGIR, 2001; ASAKAWA, 2002) citam na literatura.

Tab. 4.10 – Matriz de execução dos testes

Bitola (mm)	12,5					14,03				
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8	Teste 9	Teste 10
Velocidade de Trefilação (m/min)	60	50	60	60	50	60	60	50	50	50
Semi ângulo $\alpha$ ( $^\circ$ )	10	10	7	7	7	10	7	10	7	10
Ângulo de Endireitamento ( $^\circ$ )	17,5	17,5	17,5	16,5	16,5	17,5	17,5	16,5	16,5	17,5
Pressão de Endireitamento (A)	20	20	20	20	10	20	20	10	20	20

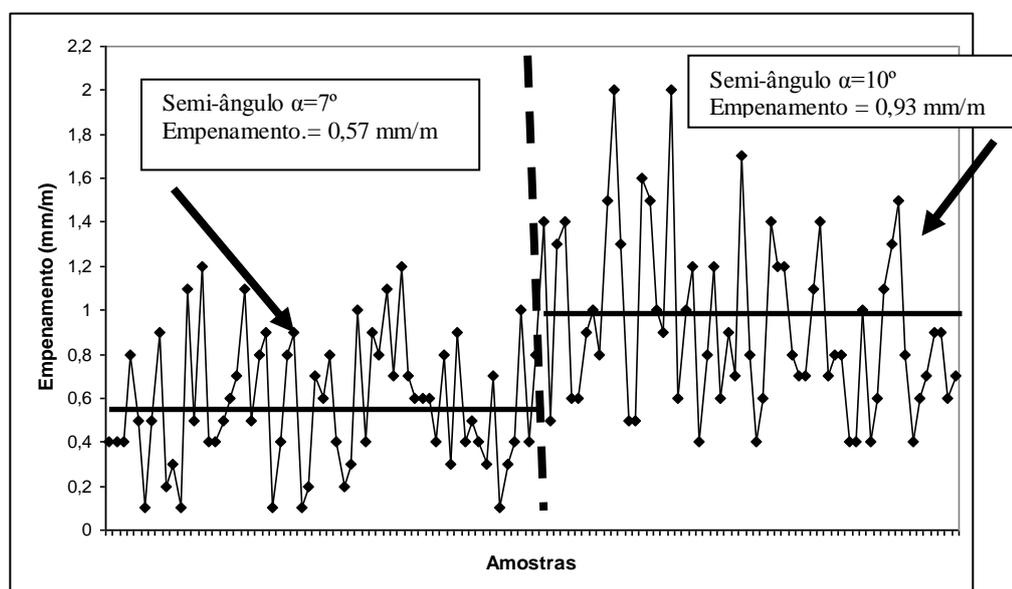


Fig. 4.18 – Variação do empenamento médio com o semi-ângulo da fieira.

#### 4.7 Ângulo dos Rolos de Endireitamento

A influência dos ângulos dos rolos de endireitamento é apresentada no histograma da figura 4.19. Em trabalhos publicados recentemente, já havia indicativos de forte influência do ângulo de endireitamento na forma final do estado de tensões das barras (METZ, 2007; ASAKAWA, 2004; ATIENZA, 2005). A comparação entre os testes 3 e 4 (conforme tabela 4.11) evidencia a influência. Wang e Gong (WANG, 2002) citam que quanto maior o contato da barra com os rolos, maior a distribuição de tensões ao longo da barra, favorecendo assim para redução do empenamento.

Tab. 4.11 – Matriz de execução dos testes

Bitola (mm)	12,5					14,03				
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8	Teste 9	Teste 10
Velocidade de Trefilação (m/min)	60	50	60	60	50	60	60	50	50	50
Semi ângulo $\alpha$ (°)	10	10	7	7	7	10	7	10	7	10
Ângulo de Endireitamento (°)	17,5	17,5	17,5	16,5	16,5	17,5	17,5	16,5	16,5	17,5
Pressão de Endireitamento (A)	20	20	20	20	10	20	20	10	20	20

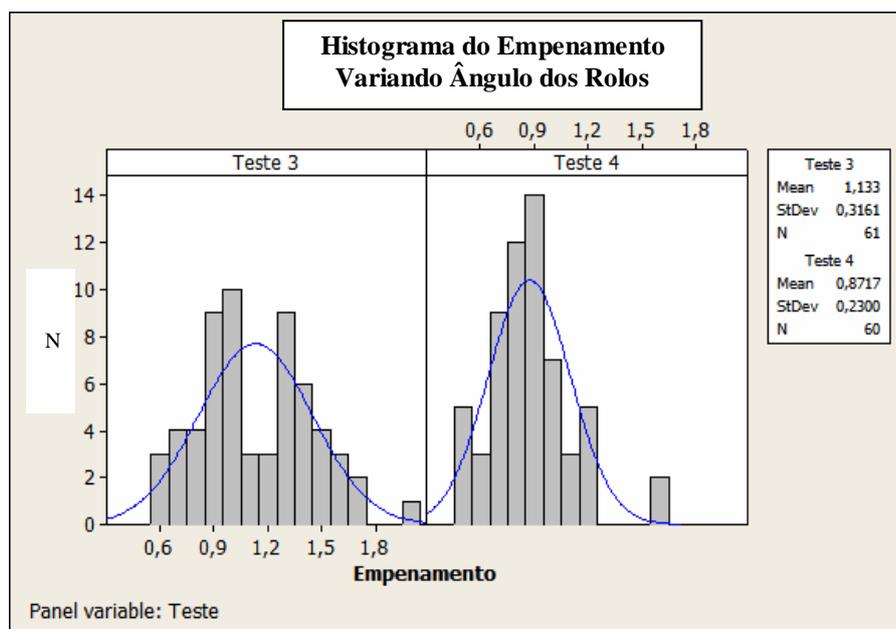


Fig. 4.19 – Histograma da variação do empenamento em relação a influência dos ângulos dos rolos de endireitamento.

#### 4.8 Pressão dos Rolos de Endireitamento

A influência da pressão dos rolos de endireitamento é apresentada nos histogramas das figuras 4.20 e 4.21. A comparação entre os testes 5 e 9 (conforme tabela 4.12) evidencia que, com o aumento da pressão dos rolos de 10 para 20A, não só podemos constatar um melhor polimento nas barras como também um leve deslocamento da curva normal em direção a redução da variabilidade do empenamento, ou seja, uma maior pressão nos rolos de endireitamento favorece a redução do empenamento. Esta pressão está associada a distância entre os rolos, forçando a flexão do material e, por conseqüência, reduzindo o empenamento do material.

Tab. 4.11 – Matriz de execução dos testes

Bitola (mm)	12,5					14,03				
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8	Teste 9	Teste 10
Velocidade de Trefilação (m/min)	60	50	60	60	50	60	60	50	50	50
Semi ângulo $\alpha$ (°)	10	10	7	7	7	10	7	10	7	10
Ângulo de Endireitamento (°)	17,5	17,5	17,5	16,5	16,5	17,5	17,5	16,5	16,5	17,5
Pressão de Endireitamento (A)	20	20	20	20	10	20	20	10	20	20

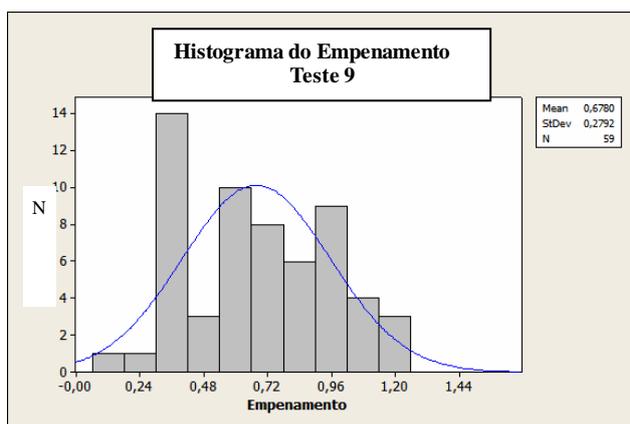


Fig.4.20 – Histograma da variação do empenamento em relação a influência da pressão dos rolos de endireitamento

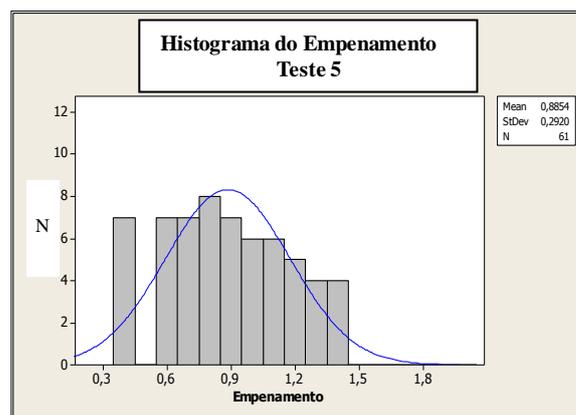


Fig.4.21 – Histograma da variação do empenamento em relação a influência da pressão dos rolos de endireitamento

#### 4.9 Influência Combinada do Semi-ângulo da Fieira, Ângulo dos Rolos de Endireitamento e Pressão dos Rolos de Endireitamento no Empenamento

A figura 4.22 apresenta o resultado do empenamento médio da relação entre semi-ângulo de fieira, ângulos e pressão de endireitamento, variando os valores máximos ao mínimo da faixa estipulada. As medições de empenamento para o teste 4, bitola 12,5mm, mostram uma forte influência na variável resposta desvio-padrão (figura 4.23) do empenamento para a variável de processo semi-ângulo de fieira. Para a variável resposta empenamento médio não houve significância, ou seja, quando interagem ao mesmo tempo as 3 variáveis de processo, somente para o desvio-padrão a variável semi-ângulo de fieira mostra influência.

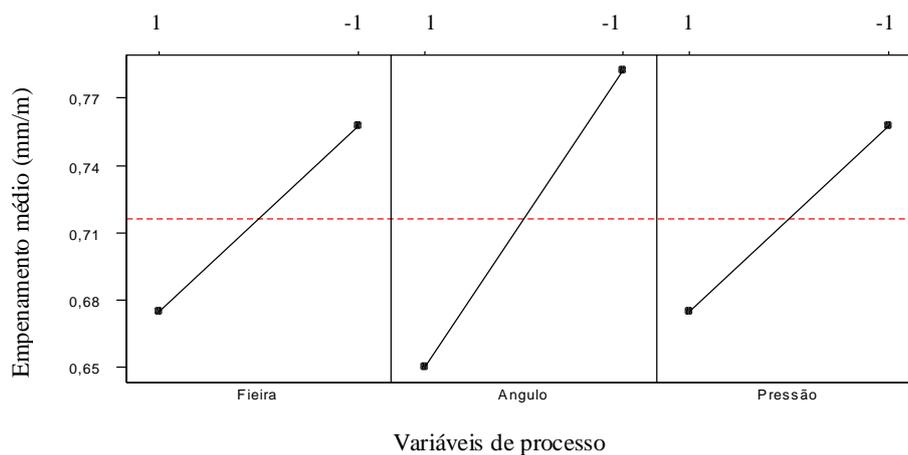


Fig. 4.22 – Comparativo do resultado da variável resposta empenamento médio para a bitola 12,5mm.

Mais uma vez, vemos que na faixa que foram realizados os testes, os ângulos e a pressão de endireitamento apresentam baixa influência no empenamento do material.

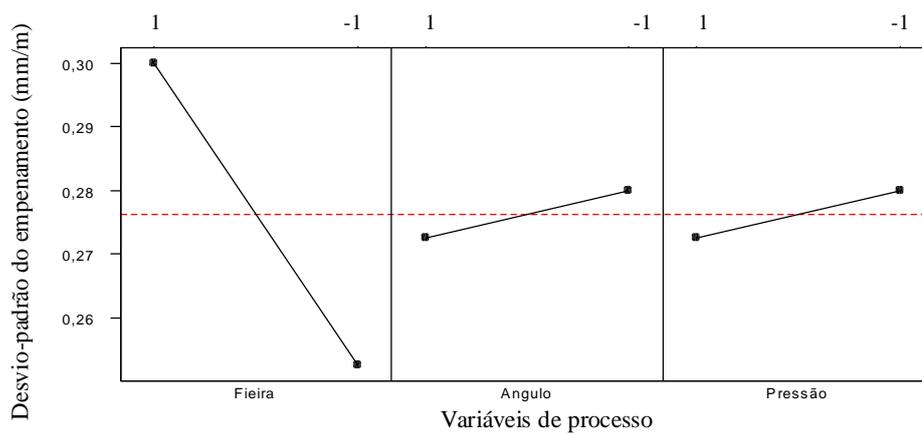


Fig. 4.23 – Resultado da variável resposta desvio-padrão do empenamento na bitola 12,5 mm

#### 4.10 Resultados da Variabilidade do Empenamento após Melhorias no Processo

As melhorias ou modificações aplicadas no processo (em relação aos processos padrão testes 1 e 6 conforme tabela 4.13) podem ser visualizadas na tabela 4.14.

Tab. 4.13 – Matriz de execução dos testes

Bitola (mm)	12,5					14,03				
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8	Teste 9	Teste 10
Velocidade de Trefilação (m/min)	60	50	60	60	50	60	60	50	50	50
Semi ângulo $\alpha$ (°)	10	10	7	7	7	10	7	10	7	10
Ângulo de Endreitamento (°)	17,5	17,5	17,5	16,5	16,5	17,5	17,5	16,5	16,5	17,5
Pressão de Endreitamento (A)	20	20	20	20	10	20	20	10	20	20

Tab.4.14 – Modificações realizadas no processo que levaram a melhoria

	Processo Padrão	Processo com Melhorias
Velocidade de Trefilação (m/min)	60	50
Semi ângulo $\alpha$ (°)	10	7
Ângulo de Endreitamento (°)	17,5	16,5
Pressão de Endreitamento (A)	20	20

As figuras 4.24 e 4.25 abaixo apresentam um comparativo entre a variabilidade do empenamento no processo padrão e anteriormente utilizado e a variabilidade do empenamento no processo atual após realização do trabalho e com as implementações das melhorias e ajustes realizados no processo.

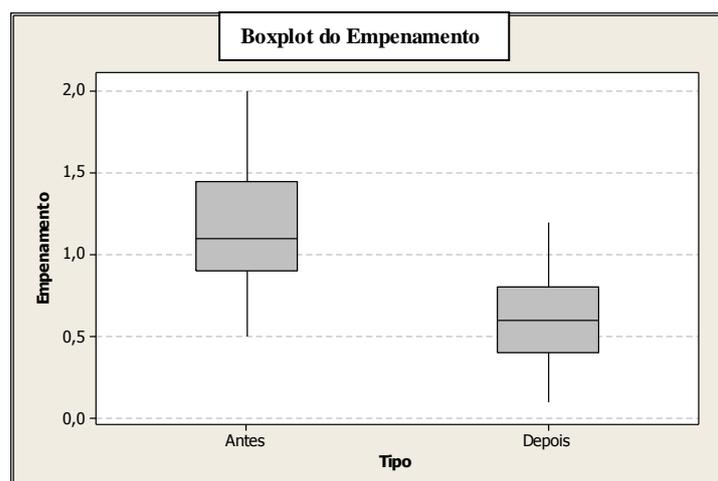


Fig. 4.24 – Resultado da variabilidade do empenamento após realização do trabalho

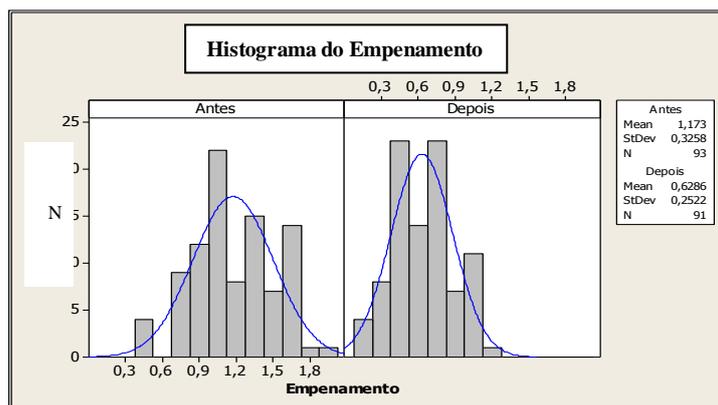


Fig. 4.25 – Histograma da variabilidade do empenamento antes e depois do trabalho

Nota-se claramente a redução da variabilidade do empenamento e do desvio padrão, atendendo a especificação do cliente. No processo padrão, a variação era de 0,5 a 2,0 mm/m (mínimo e máximo respectivamente), ou seja, fora dos requisitos do cliente, o processo não estava estabilizado podendo em algum momento, dependendo das condições de processo utilizadas (velocidade de trefilação, geometria de fieira, ângulo e pressão de endireitamento) vir a estar acima do permitido. As medições posteriores as melhorias indicam uma redução na variabilidade, com o empenamento na faixa de 0,2 a 1,2 mm/m, ou seja, dentro das limitações exigidas. Do ponto de vista do desvio padrão, para este processo e exigência, quanto menor for o mesmo melhor. Os resultados das medições mostram que o desvio padrão diminuiu, contribuindo para a estabilidade.

## 5 CONCLUSÕES

Ao longo deste trabalho, foram discutidos diversos aspectos relativos à conformação mecânica envolvida em cada etapa do processo de trefilação combinada. O objetivo, no sentido de buscar um melhor entendimento das causas do empenamento e sua redução para atendimento das necessidades do cliente, foi atingido. Também comprova-se a necessidade da utilização de uma metodologia racional e científica na busca por melhorias tecnológicas no ambiente de produção.

A partir dos resultados dos testes realizados medindo o valor do empenamento nas condições de contorno pré-determinadas e com base na revisão bibliográfica, os seguintes aspectos devem ser levados em consideração:

- I. Há uma grande variabilidade do empenamento no processo padrão, devido as inter-relações da velocidade de trefilação, semi-ângulo de fieira, pressão e ângulo de endireitamento, não satisfazendo as especificações do cliente quanto ao empenamento da barra.
- II. Não há mudanças na forma e distribuição das microinclusões ao longo do processo. Com relação a microestrutura, também não há variação detectável, devido as pequenas reduções. Provavelmente há efeito próximo a superfície da barra.
- III. A velocidade de trefilação possui relação direta com a variação do empenamento. Reduzindo a velocidade de 60 m/min para 50 m/min, há uma redução do empenamento médio do material.
- IV. O semi-ângulo da fieira exerce forte significância no empenamento.
- V. Quando há a redução do semi-ângulo da fieira de 10° para 7°, há uma redução do empenamento médio, tendo como 7° o melhor semi-ângulo para este processo conforme testes realizados.
- VI. Os testes reduzindo os ângulos de endireitamento para 16,5° e aumentando a pressão dos rolos de endireitamento mostraram significância no empenamento, não apenas contribuindo para manter a retilinidade e polimento das barras, mas também na redução da variabilidade do empenamento. Porém, estes resultados foram obtidos para diferentes bitolas, não se podendo concluir que eles influenciaram na redução do empenamento.
- VII. As alterações no processo de trefilação permitiram garantir atendimento das especificações do cliente em relação ao empenamento do material.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Das várias perspectivas que se abrem a partir deste trabalho, podemos citar as seguintes sugestões:

- Dar continuidade ao trabalho realizado, determinando as variações de tensões residuais em barras do aço trefiladas vindo de outras etapas do processo de trefilação, identificando os potenciais de distorção relacionados ao material;
- Verificar a influência da segregação de carbonetos durante o processo de aciaria e sua influência no empenamento do aço SAE 9254;
- Ampliar melhorias obtidas com o trabalho para outras qualidades de aço críticas para empenamento;
- Verificar interrelação entre pressão dos rolos de endireitamento e ângulos dos rolos de endireitamento em relação a otimização dos mesmos.

## 7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, S., **Integração das Ferramentas da Qualidade ao PDCA e ao Programa Seis Sigma**, Ed. INDG, 2002.

ASAKAWA, M., SASAKI, W., SHISHIDO, S. **Effect of Die Approach Geometry and Bearing Length on Residual Stress After Bar Drawing**. Wire Journal International. p.68-72, 2002.

ASAKAWA et al., **Producing Bar and Wire with Ultra-Smoothing and Lower Residual Stress by New Drawing**, Wire Journal International, 2004.

ATIENZA J. et al., **Residual Stress in Cold Drawn Ferritic Rods**, Scripta Materialia 52, p.305-309, 2005.

AVITZUR, B. **An Upper Bound Approach for the Direct Drawing of Square Section Rod From Round Bar**. Proceeding of the 20<sup>th</sup> International Machinery Tool Design and Research Conference. 1979.

AVITZUR, B. **Study of Flow through Conical Converging Dies**. Institute for Metal Forming. Department of Metallurgy and Materials Science, Lehigh University. 1974.

AVITZUR, B. **Metal Forming: Process and Analysis**. McGraw-Hill, New York, 1968.

BASILY, B., SANSOME, D., **Some Theoretical Considerations for the Direct Drawing of Section Rod From Round Bar**. International Journal Mechanical Science, p.201-208, 1976.

BASILY, B., SANSOME, D., **Determination of the Mean Coefficient of Friction in the Direct Drawing of Section Rod From Round Bar**. Proceedings of the 17th International Machinery Tool Designs and Research Conference, 1976.

BARREIRO, J. **Aceros Especiales**, Ed. Dossat, 2º Ed. p.127-147, 1978.

BOYER, H. E. **Cold Finished Steel Bars**, in AMERICAN SOCIETY FOR METALS, Committee on Carbon and Alloy Steel, Metals Handbook, 9º ed., p.215-251, 2002.

BHADESHIA, H. K. D. H. **Material Factors in Handbook of Residual Stress and Deformation**. ASM, p.3-9, 2002.

CETLIN, P. R., HELMAN, H. **Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais**. Artliner, 2005.

CHEN, et al., **Bauschinger Effect and Multiaxial Yield Behavior of Stress-Reversed Mild Steel**, Metallurgical and Material Transactions, p.3069-3078, 1999.

DARENDELIER, H., KAFTANOGLU, B. **Deformation Analysis of Deep-Drawing by a Finite Element Method**, CIRP 40, p.281-284, 1991.

DEMING, W. E. **Qualidade: a Revolução na Administração**. Marques-Saraiva, 1990.

DOLLAR, M., BERNSTEIN, I., THOMPSON, W. **Influence of Deformation Substructure on Flow and Fracture of Fully Pearlitic Steel**. Acta Metal, p.311-320, 1998.

EMBURY J. D, FISCHER R. M, **The Structure and Properties of Drawn Pearlite**. Acta Metal, Review 2, p. 147-159, 1966.

EZEILO, A., **Analysis of Residual Stress by Diffraction using Neutron and Synchrotron Radiation**, Taylor & Francis, p.251-262, 2003.

FREESE, S., **Otimização dos Parâmetros de Endoreitamento de uma Endireitadeira Duplo-Rolos**, Trabalho de Conclusão de Curso, UFRGS, p. 15-17, 2007.

GIL-SEVILLANO, J. PhD. Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, 1974.

GUNASEKERA, J., HOSHINO, S. **Analysis of Strusion or Drawing of Polygonal Sections Through Straightly Converging Dies**. ASME, p.37-45, 1982

HAUK, V., HOLLER, P., MACHERAUCH, E. **Measuring Techniques of Residual Stresses-Present Situation and Future Aims**. ICRS5, p.231-245, 1999.

HAUK, V. **Structural and Residual Stress Analysis by Non-destructive Methods**, Elsevier, 1997.

HEITMANN, W. E., BHATTACHARYA, D. **Evaluation of Stregth, Ductility and Machinability of Hot Rolled and Cold Drawn Medium Carbon Steels with and without Microalloying Additions**. RLISC, p.249-269, 2000.

HOSHINO, S., GUNASEKERA, J., **An Upper Bound Solution for the Extrusion of Square Section From Round Bar Through Converging Dies**. Proceedings of the 21<sup>th</sup> International Machinery Tool Designs and Research Conference, 1980.

ISHIKAWA, K. **Controle de Qualidade Total: A Maneira Japonesa**. Campus, 1993.

KESSLER, O., PRINZ C., SACKMANN T., NOWAG L., SURM H., FRERICHS F., LUBEEN T., ZOCH W. **Experimental Study of Distortion Phenomena in Manufacturing Chains**. Werkstofftech, p.11-18, 2006.

KIM, H., CHOI, Y., KIM, B. **Three Dimensional Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Non-State Shaped Drawing Process**. International Journal Machine Tools Manufacturing, p.1135-1155, 1999

LEE, E., MALLET, R., YANG, W. **Stress Deformation Analysis of Metal Extrusion Process**. Applied Mechanical Engineering, p.339-353, 1977.

LU, J. **Handbook of Measurement of Residual Stresses**. SEM, Inc. 1996

MACKENZIE, B. **Drawn Sections Approach Net Shape**. American Machinist, p.109-110, 1980.

MACHERAUCH, E., KLOOS, K. **Origin, Measurement and Evaluation of Residual Stress**. Science Technology, p.3-27, 1987.

MAKER, J. **Metals Handbook - Steel Springs**, p.283-313, 2002.

METZ, M. et al., **Análise Qualitativa das Tensões Residuais Longitudinais em Barras Trefiladas do Aço SAE 1045 através do Método Sliting**, 8º Congresso Ibero-Americano de Engenharia Mecânica, Peru, 2007.

MISCHKE, J., JONCA, J. **Simulation of the Roller Straightening Process**. JMPT, p.265-272, 1992.

MONTGOMERY, D. C. **Introduction to Statistical Quality Control**. John Willey and Sons. 1990.

MONTGOMERY, D.C. **Design and Analysis of Experiments**. John Wiley & Sons, Inc, 1997.

MOREIRA, A., DARÉ, C., SILVA, PEDRO. **Black Belt Sessão I Industrial**. Apostila da Indg, p.37-52, 2004.

NAKAGIRI, A., YAMANO, T., KONADA, M., ASAKAWA, M., SASAKI, W. **Behavior of Residual Stress and Drawing Stress in Conical-Type Die and Circle-Type Die Drawing by FEM Simulation and Experiment**. Wire Journal International, p.72-80, 2001.

NASTRAN, M.; KUZMAN, K., **Stabilization of Mechanical Properties of the Wire by Roller Straightening**, Journal of Material Processing Technology, p.711-719, 2002.

NEWBURY, B., NOTIS, M. **The History and Evolution of Wire Drawing Techniques**. JOM, p.33-37, 2004.

NOYAN, I., COHEN, J., **The Nature of Residual Stress and its Measurement**. Springer Verlag, p.1-17, 1987.

ONODA, et al., **A Fem Simulation of Two-Roll Straightening for Bars and Wires, International Conference on Technology of Plasticity (7<sup>th</sup> ICTP)**, Yokohama, Japan, p.625-630, 2002.

PAESE, C. **Estudo de uma Metodologia para Estabilização de Processos**. Tese de Mestrado, UFRGS, 2000.

PAGE, Roy. **Rolls for Tube Straightening Machines**. The International Magazine For The Tube & Pipe Industries, 2007.

RIVOLTA, B., SILVA, G., ROTA, M., CUSOLITO, M. **Drawn Bars: Influence of Straightening Conditions**. Wire Journal International, p.77-81, 2004.

SCHAJER, G., ALBERT, J. **Stress Determination for Coatings**. Surface Engineering, ASM Handbook, p.647-653, 1994.

SHEMENSKI, R. M., **Wire Drawing by Computer Simulation**, Wire Journal International. p.166-183, 1999.

SHIN, J., SUNGHAK, L., RYU, J. **Correlation of Microstructure and Fatigue Properties of Two High-Strength Spring Steels.**, International Journal of Fatigue, p.571-579, 1999.

SMITH Jr, Richard P., **The Effect of the Number of Leveling Rolls on the Straightening Process**, 2002.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, **Report HS-784: Residual Stress Measurement by X-Ray Diffraction**, p.4-6, 2003.

SRIVATSAN T.S, DANIELS C, **The Tensile Response of High Carbon Steel Wires**. Wire Journal International, p.202-209, 1998.

SUN, S., GONG, B., WANG, Z. **Modification of the Strengthening Model for Cold Drawing of Carbon Steel Wires**. Innovative Technologies for Steel and Other Materials, p. 333-343, 2001.

TALUKDER, N., JOHNSON, W., **On the Arrangement of Rolls in Cross-Roll Straightners**, IJMS, p.213-220, 1981.

YANHUI et al., **Calculation of Relaxation of Residual Stress and Change of Yield Strength in Shoot Penned Layer**, Material Science Forum, p.396-403, 2005.

WANG. K., ARGYROPOULOS, V. **Design and Analysis of Direct Cold Drawing of Section Rods Through a Single Die**. Journal of Materials Processing Technology, p.345-358, 2005.

WANG, Z., GONG, B., **Residual Stress in the Forming of Materials, Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel**, G. E. Totten, ASM International, 2002.

WEBSTER, W., DAVIS, R., **Finite Element Analysis of Round to Square Extrusion Processes**, Proceedings of the 6<sup>th</sup> North America Manufacturing Research Institute of SME, 1978.

WERKEMA, M. C. C. **As Ferramentas da Qualidade no Gerenciamento de Processos**. Fundação Cristiano Ottoni, p.81-87, 1995.

WHITERS, P., BHADSHIA, K. **Residual Stress, Part I**. Material Science and Technology, p.355-365, 2001.

WHITHERS, P., BHADSHIA, K. **Residual Stress, Part 2**. Material Science and Technology, p.366-375, 2001.

WISTREICH, J., SCHUTT, A., **Theoretical Analyses of Bloom and Billet Forging**. Journal of the Iron and Steel Institute, p.163-176, 1959.

WRIGHT, R.N., **Mechanical Analysis and Die Design**, Wire Journal International, p.60-64, 1979.

WU, J. B. **A Study on the Precision Modeling of the Bars Produced in Two Cross-Roll Straightening**. Journal of Materials Processing Technology, p.202-206, 1999.

ZOCH, H. **From Single Production Step to Entire Process Chain – the Global Approach of Distortion Engineering**. Wiley Interscience, p.6-10, 2006.



