

EFEITO DO ÂNGULO DA FIEIRA NA GEOMETRIA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE BARRAS TREFILADAS¹

Gustavo de Alvarenga Couto²
Paulo Roberto Cetlin³
Aylton Benício Lima⁴

Resumo

O objetivo deste trabalho foi avaliar o impacto das variáveis: ângulo da fieira, comprimento do paralelo e número de passes, na geometria e propriedades mecânicas de barras trefiladas de aço SAE 1045 no processo de trefilação combinada, além de relacionar estas diferentes condições com a ocorrência de empenamento de hastes de amortecedores após o processo de têmpera superficial por indução. Foram realizados experimentos com ângulos de fieira de 12°, 18°, 30° e 40°, comprimentos de paralelo de 3,51 mm a 7,09 mm, com 1 e 2 passes de trefilação. Foram realizadas medições de retilidade, diâmetro e ovalização, além de ensaios de tração. Também foram realizadas medições de retilidade de hastes de amortecedor após o processo de têmpera. Com este trabalho foi possível verificar que o ângulo da fieira exerce forte influência na geometria final das barras, sendo que fieiras com maior ângulo (30° e 40°) resultaram em melhores valores de retilidade em comparação às fieiras com ângulos menores (12° e 18°) e também em menor variação entre o diâmetro do paralelo e o diâmetro final da barra. Também foi observada uma forte relação entre a retilidade das barras e a retilidade das hastes de amortecedor após o processo de têmpera.

Palavras-chave: Trefilação; Fieira; Retilidade; Têmpera superficial por indução.

INFLUENCE OF THE DIE ANGLE ON THE FINAL GEOMETRY AND MECHANICAL PROPERTIES OF DRAWN BARS

Abstract

The objective of this study was to evaluate the impact of the variables: die angle, bearing length and number of drawing passes on the final geometry and mechanical properties of drawn bars of SAE 1045 steel, and to relate these different conditions with the occurrence of warping of shock absorber rods after the induction hardening process. Experiments were performed with die angles of 12°, 18°, 30° and 40°, bearing lengths from 3,51 mm to 7,09 mm, and 1 or 2 passes of drawing. Measurements of straightness, roundness and diameter, and tensile tests were performed. Also were made measurements of straightness of shock absorbers rods after the induction hardening process. This study has shown that the die angle has a strong influence on the final geometry of the drawn bars; dies with high angle (30° and 40°) resulted in better values of straightness than dies with smaller angles (12° and 18°) and also in less variation between the bearing diameter and the final diameter of the bar. It was also observed a strong relation between the straightness of the drawn bars and the straightness of the shock absorbers rods after the induction hardening process.

Key words: Drawing; Die; Straightness; Induction hardening process.

¹ Contribuição técnica ao 48º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 24 a 27 de outubro de 2011, Santos, SP.

² Eng. Mecânico, Engenheiro de Produto e Assistência Técnica - ArcelorMittal Sabará.

³ Doutor, Professor Titular - Universidade Federal de Minas Gerais.

⁴ Mestre, Gerente de Produção - ArcelorMittal Sabará.

1 INTRODUÇÃO

A partir do desenvolvimento de programas de qualidade e produtividade, baseados nos conceitos de estabilidade dos processos produtivos, surge a necessidade de conhecimento e controle de efeitos não esperados nos mesmos. Da mesma forma, a necessidade de flexibilidade e respostas rápidas aliadas à diminuição gradativa de estoques em processo não toleram reprocessos, devoluções, sucateamento e instabilidade dentro das linhas produtivas.

Durante o processo de trefilação são impostas deformações heterogêneas ao longo da seção transversal das barras, gerando nas mesmas tensões residuais que podem acarretar em mudança nas suas dimensões e retilidade durante processos de corte, retífica e tratamento térmico ulteriores. Isto ocorre porque quando uma peça metálica passa de um processo de fabricação a outro ao longo de uma rota de fabricação, seu estado de tensões residuais pode ser rearranjado e um novo estado de tensões gerado. É o que pode ser observado, por exemplo, na fabricação de hastes de amortecedores automotivos, onde uma barra trefilada após passar pelo processo de têmpera superficial por indução apresenta uma forte variação na sua retilidade. Estando a geometria da fieira relacionada com o nível de deformação heterogênea ao longo da seção transversal das barras trefiladas, conseqüentemente está também relacionada ao estado de tensões residuais presente nas barras e na posterior variação da retilidade das hastes de amortecedor após o processo de têmpera superficial por indução. Conhecer a geometria ideal de fieira que minimize este efeito é o primeiro passo para a redução da variabilidade do processo.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho foi avaliar o impacto das variáveis: ângulo da fieira, comprimento do paralelo e número de passes, na geometria e propriedades mecânicas de barras trefiladas de aço SAE 1045 no processo de trefilação combinada, além de relacionar estas diferentes condições de trefilação com a ocorrência de empenamento de hastes de amortecedores após o processo de têmpera superficial por indução.

1.2 Revisão da Literatura

1.2.1 A fabricação de barras trefiladas

O processo de trefilação combinada consiste na produção de barras trefiladas a partir de bobinas de aço laminados a quente, chamados de fio máquina. Estas bobinas são endireitadas em um processo com múltiplos rolos, jateadas, trefiladas e endireitadas em um processo com dois rolos hiperbólicos. A trefilação combinada permite o acabamento a frio de barras de aço e apresentam várias vantagens, como alta precisão do diâmetro trefilado, alta produtividade das máquinas e excelente condição superficial das barras trefiladas, além do baixo custo com ferramental,⁽¹⁾ sendo comumente utilizada na fabricação de barras para hastes de amortecedores. A Figura 1 mostra um exemplo de fluxo de processo de uma trefilação combinada para produção de barras para hastes de amortecedores.

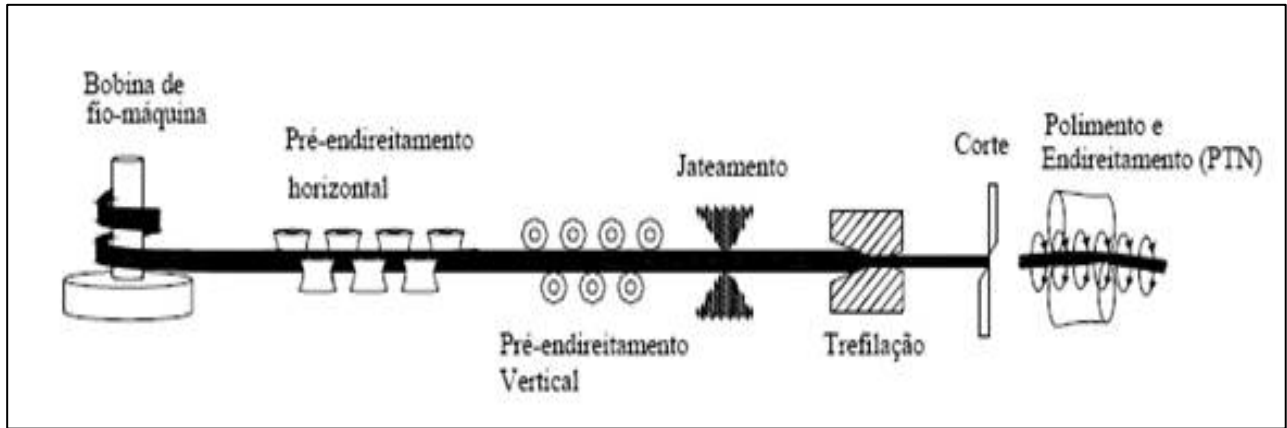


Figura 1. Fluxo de processo de uma trefilação combinada para produção de barras para hastes de amortecedores.⁽²⁾

O processo de trefilação consiste em forçar a passagem de uma barra através de uma fieira mediante a aplicação de uma força de tração à saída desta fieira.⁽³⁾ Tem-se como resultado uma redução na área de seção reta, com um correspondente aumento no comprimento. A operação de trefilação, por ser um processo de conformação mecânica à frio, produz um aumento na resistência do material, com uma conseqüente redução na ductilidade. A fieira (Figura 2) apresenta basicamente quatro regiões de maior importância, sendo: o cone de entrada, o cone de trabalho, a zona cilíndrica (ou cilindro de calibração) e o cone de saída. O cone de entrada normalmente tem ângulo maior que o cone de trabalho e objetiva facilitar o processo de lubrificação. No cone de trabalho é onde ocorre a deformação plástica do material, devido à redução de área que ocorre, e seu ângulo está diretamente ligado à força de trefilação, sendo variável em função do tipo de material a ser trefilado (aço, cobre etc). No cilindro de calibração é onde se define a geometria e dimensões do material que está sendo trefilado. No cone de saída ocorre a recuperação elástica e conseqüente aumento no diâmetro em relação à região anterior, devido ao alívio das tensões compressivas aplicadas nas duas regiões anteriores.

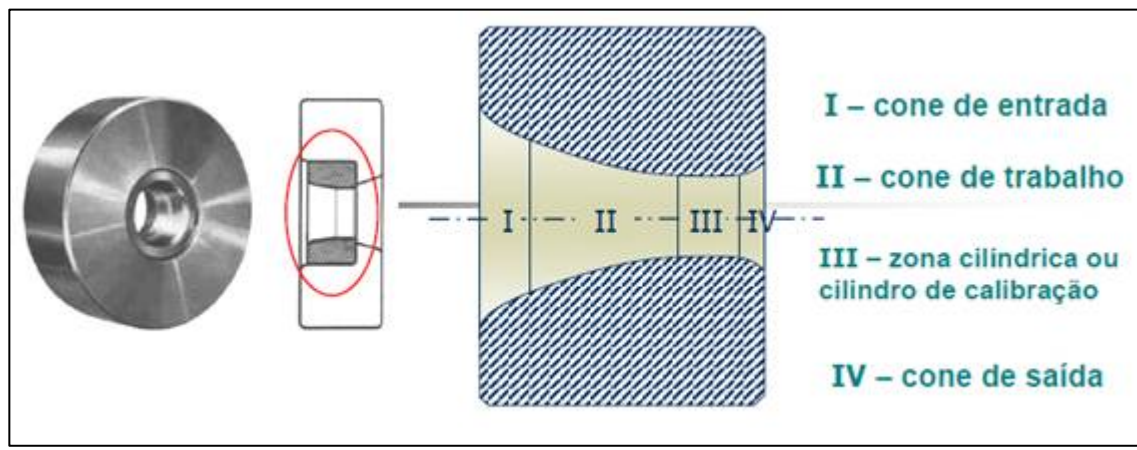


Figura 2. Exemplo de fieira e suas 04 regiões principais.⁽⁴⁾

1.2.2 Tensões residuais em barras trefiladas

Trabalhos têm sido realizados no sentido de modificar o padrão de tensões residuais presente em barras trefiladas e assim minimizar os efeitos indesejáveis. As soluções apresentadas são muitas vezes complexas e de difícil aplicação industrial, ou consideram processos adicionais à trefilação, onerando assim os custos de produção.

Akiyama et al.⁽¹⁾ e Asakawa, Sasaki e Shishido⁽⁵⁾ propuseram e comprovaram a eficiência de novas geometrias de fieira, dentre elas um modelo com duas porções cônicas consecutivas e ângulo da segunda porção cônica muito pequeno, o que consequentemente implica em um comprimento de fieira um pouco maior do que o usual. O conceito deste modelo é a produção de um efeito similar ao do *skin pass*, onde a redução de área muito leve na segunda porção cônica reduz consideravelmente a tensão residual axial, pois se adiciona uma deformação plástica axial extra à superfície e centro, sendo maior na superfície que no centro, gerando assim uma compensação do alongamento desproporcional entre o centro e a superfície da barra. Cabe ressaltar que os experimentos laboratoriais foram realizados numa banca de trefilação (trefilação de barra para barra e não de bobina para barra) e a barra base utilizada sofreu recozimento prévio para eliminação de qualquer tensão residual anterior à trefilação.

Nunes⁽²⁾ realizou análises da variação das tensões residuais em barras trefiladas retiradas de quatro diferentes etapas do processo de trefilação combinada, sendo elas: pré-endireitamento, jateamento, trefilação e endireitamento/polimento por rolos cruzados, objetivando identificar quais etapas do processo têm maior influência na barra trefilada final. No pré-endireitamento as tensões residuais encontradas foram principalmente compressivas e variáveis ao longo do perímetro da barra. No jateamento as tensões residuais encontradas foram de intensidade bem maior quando comparadas com as tensões geradas na etapa anterior, sendo também compressivas na superfície (devido à deformação plástica imposta pelas granalhas), mas tendendo a trativas com o aumento da profundidade, mostrando ainda pequenas variações ao longo do perímetro da barra. Na trefilação novamente foram observadas tensões residuais bastante variáveis ao longo do perímetro da barra, mas aqui foram induzidas tensões trativas e de alta intensidade na superfície, mas tendendo a compressivas com o aumento da profundidade. No endireitamento/polimento por rolos cruzados as tensões residuais encontradas também foram de grande intensidade, sendo compressivas (até 1,00 mm de profundidade) e mostrando pequena variação ao longo do perímetro da barra. Em resumo, foram observados diferentes padrões de tensão residual para cada etapa da trefilação combinada, sendo que em alguns casos o padrão de tensões residuais do processo anterior foi sobreposto pelo processo seguinte e em outros casos o padrão de tensões residuais do processo anterior se manteve após o processo seguinte.

Em nenhuma das referências bibliográficas citadas^(1,2,5) foi feito relacionamento entre as tensões residuais e a retilidade das barras trefiladas e também não foi encontrado na literatura nenhum estudo da influência da retilidade das barras trefiladas no processo de têmpera superficial por indução.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do trabalho, a coleta de dados foi feita durante o processamento das bobinas (fio máquina) de aço 1045 laminadas a quente via Stelmor, da usina integrada da ArcelorMittal João Monlevade, as quais foram trefiladas em barras redondas na ArcelorMittal Sabará, na máquina Schumag 906, modelo KZ-III-B. As fieiras com diferentes ângulos foram adquiridas da Belgo Bekaert Arames, que fez o encarcaçamento, realizou a usinagem dos núcleos adquiridos externamente e fez a

medição final completa através de traçador de perfil. Os ensaios para obtenção das propriedades mecânicas foram realizados na Belgo Bekaert Arames, em uma máquina de tração Wolpert de 100 t. A verificação prática dos resultados obtidos foi realizada durante processamento dos materiais em um fabricante de amortecedores, onde foram realizadas medições de retilidade das hastes de amortecedor após o processo de têmpera superficial por indução. Foi utilizado fio máquina de diâmetro 22,50 mm com tolerância de $\pm 0,30$ mm para trefilação das barras no diâmetro de 20,40 mm, com tolerância de $+0,00$ mm – 0,10 mm. Durante a produção das barras trefiladas foram utilizados micrômetros digitais Mitutoyo para verificação de diâmetro e ovalização e relógio comparador Mitutoyo para verificação da retilidade das barras. A medição da retilidade das barras trefiladas foi realizada na metade do seu comprimento e também em ambas as pontas (cabeça e cauda), em balanço (Figura 3). Neste procedimento, a barra é apoiada sobre rolamentos equidistantes, ficando 250 mm de ambas as pontas da barra sem apoio. O relógio comparador é apoiado sobre a cabeça da barra e então o mesmo é zerado. Promove-se a rotação manual da barra em 360° até se encontrar o máximo valor em milímetros. Neste ponto de máximo valor é novamente zerado o relógio comparador. Então se promove nova rotação manual da barra em 360° e o máximo valor encontrado é registrado como o resultado final da retilidade na cabeça da barra. Depois o relógio comparador é deslocado para a cauda da barra e repetem-se os passos acima para a obtenção do resultado final da retilidade na cauda da barra. O mesmo é feito para a medição no meio da barra. Foram realizadas três medições por barra (uma na cabeça, uma na cauda e uma no meio) em seis barras de cada experimento.

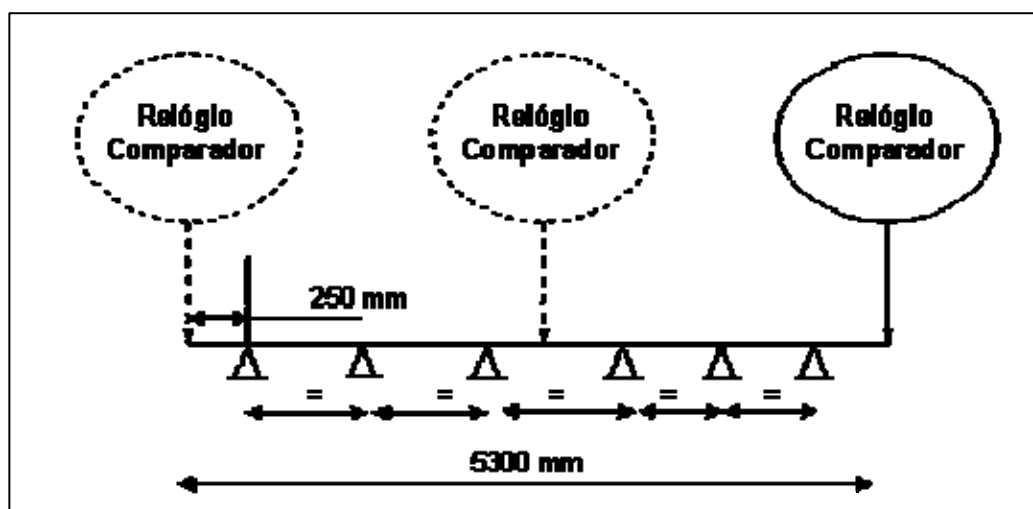


Figura 3. Medição da retilidade das barras trefiladas.

Os parâmetros variados nos experimentos foram a geometria da fieira e o número de passes de trefilação e foram mantidos constantes e controlados os demais, como diâmetro do fio máquina de partida, regulagem dos pré-endireitadores horizontal e vertical, vazão de granalha do jateamento, velocidade, pressão e ângulo dos rolos hiperbólicos de endireitamento, etc. Foram realizados experimentos com oito situações diferentes (Tabela 1).

Tabela 1. Planejamento dos experimentos

Experi- mentos	Fatores				RA (%)	Lotes Gerados
	Número de Passes	Ângulo Fieira	Comprimento Paralelo	Diâmetro Paralelo		
1	1	18°	4,21mm	20,25mm	19,00	1086126004
2	1	12°	4,46mm	20,25mm	19,00	1086126003
3	1	30°	5,67mm	20,25mm	19,00	1086126005
4	1	40°	4,34mm	20,25mm	19,00	1086126006
5	1	12°	7,09mm	20,25mm	19,00	1086126002
6	1	30°	6,48mm	20,25mm	19,00	1086126001
7	2	12° e 12°	3,51mm e 4,46mm	20,65mm e 20,25mm	15,77 e 3,84	1086126007
8	2	12° e 12°	4,76mm e 4,46mm	21,64mm e 20,25mm	7,50 e 12,43	1086126008

3 RESULTADOS

3.1 Geometria

3.1.1 Resultados de retilineidade após trefilação

Na Tabela 2 são mostrados os resultados das médias das medições de retilineidade realizadas nas barras trefiladas dos lotes gerados em cada experimento e o desvio padrão obtido. Analisando as médias das medições, pode-se observar que os lotes 1086126001, 1086126005 e 1086126006 apresentaram os melhores resultados e o lote 1086126007, com dois passes de trefilação, foi o que apresentou o pior resultado. Analisando o desvio padrão, observa-se este mesmo perfil.

Tabela 2. Resultados de retilineidade

LOTE	RETILINEIDADE - MÉDIA (mm)				RETILINEIDADE - DESVIO PADRÃO			
	CABEÇA	MEIO	CAUDA	TOTAL	CABEÇA	MEIO	CAUDA	TOTAL
1086126001	0,540	0,090	0,624	0,418	0,114	0,032	0,162	0,268
1086126002	1,290	0,097	1,243	0,877	0,301	0,028	0,237	0,604
1086126003	1,318	0,253	1,281	0,950	0,155	0,322	0,187	0,551
1086126004	1,275	0,184	1,146	0,862	0,243	0,062	0,161	0,533
1086126005	0,481	0,115	0,850	0,415	0,168	0,027	0,127	0,257
1086126006	0,780	0,151	0,917	0,478	0,097	0,023	0,187	0,282
1086126007	1,870	0,201	1,919	1,130	0,328	0,057	0,118	0,705
1086126008	1,076	0,156	1,106	0,779	0,136	0,076	0,187	0,471

3.1.2 Resultados de empenamento após têmpera

Na Tabela 3 são mostrados os resultados das médias das medições do empeno após o processo de têmpera superficial por indução em um fabricante de amortecedores, realizadas nas hastes de amortecedores provenientes dos lotes gerados em cada experimento e também o desvio padrão obtido. Analisando as médias das medições e o desvio padrão, pode-se observar que apenas os lotes 1086126001, 1086126005 e 1086126006 apresentaram resultados dentro da especificação de máximo 0,10 mm (considerando o desvio padrão), sendo que os lotes 1086126005 e 1086126006 foram os que apresentaram os melhores resultados.

Tabela 3. Resultados do empeno após têmpera

LOTE	EMPENAMENTO APÓS TÊMPERA	
	MÉDIA (mm)	DESVIO PADRÃO
1086126001	0,06	0,04
1086126002	0,11	0,02
1086126003	0,10	0,03
1086126004	0,08	0,03
1086126005	0,05	0,02
1086126006	0,05	0,02
1086126007	0,09	0,02
1086126008	0,08	0,03

3.1.3 Resultados dimensionais

Na Tabela 4 são mostrados os resultados das médias das medições de diâmetro e ovalização, realizadas nas barras trefiladas dos lotes gerados em cada experimento e o desvio padrão obtido. Para a característica diâmetro, analisando as médias das medições, pode-se observar que os lotes 1086126005 e 1086126006 foram os que apresentaram menor variação entre o diâmetro do paralelo da fieira e o diâmetro final das barras trefiladas. Analisando o desvio padrão pode-se considerar que não houve diferenças significativas entre os lotes, pois as variações entre barras de cada experimento se mantiveram na casa dos milésimos de milímetro, sendo exceção apenas o lote 1086126007. Para a característica ovalização, analisando as médias das medições, não se observam diferenças significativas entre os lotes, e quanto ao desvio padrão também pode-se considerar as observações acima, ou seja, as variações entre barras de cada experimento se mantiveram na casa dos milésimos de milímetro.

Tabela 4. Resultados dimensionais

LOTE	DIÂMETRO PARALELO (mm)	DIÂMETRO BARRAS (mm) - MÉDIA	DIFERENÇA ENTRE Ø BARRAS E Ø PARALELO	DIÂMETRO - DESVIO PADRÃO
1086126001	20,250	20,320	0,070	0,004
1086126002	20,250	20,395	0,140	0,005
1086126003	20,250	20,340	0,090	0,006
1086126004	20,260	20,309	0,060	0,008
1086126005	20,250	20,270	0,020	0,009
1086126006	20,250	20,267	0,010	0,006
1086126007	21,251	21,374	0,120	0,013
1086126008	20,250	20,311	0,060	0,006
LOTE	OVALIZAÇÃO (mm) - MÉDIA		OVALIZAÇÃO - DESVIO PADRÃO	
1086126001	0,008		0,003	
1086126002	0,008		0,004	
1086126003	0,010		0,003	
1086126004	0,013		0,003	
1086126005	0,018		0,004	
1086126006	0,011		0,003	
1086126007	0,007		0,003	
1086126008	0,012		0,003	

3.2 Propriedades Mecânicas

3.2.1 Resultados dos ensaios físicos

Na Tabela 5 são mostradas as propriedades mecânicas obtidas nas amostras de barras trefiladas dos lotes gerados em cada experimento.

Tabela 5. Propriedades mecânicas

LOTE	LR (kgf/mm ²)	LE (kgf/mm ²)	ALONGAMENTO (%)	ESTRICÇÃO (%)
1086126001	83	76	13	39
1086126002	83	76	11	42
1086126003	83	76	12	42
1086126004	84	78	12	41
1086126005	86	78	12	40
1086126006	86	79	14	39
1086126007	83	75	11	43
1086126008	83	75	12	43

4 DISCUSSÃO

4.1 Geometria

4.1.1 Retilidade após trefilação

Os lotes 1086126001, 1086126005 e 1086126006 foram trefilados com fieiras com ângulos maiores, sendo os lotes 1086126001 e 1086126005 produzidos com fieira de 30° e o lote 1086126006 produzido com fieira de 40°. Conforme Dieter,⁽⁶⁾ a maior parte da deformação plástica observada dentro da fieira pode ser atribuída às tensões de compressão impostas ao material, devido ao contato entre a barra e a fieira; e que apesar da deformação cisalhante aumentar com o aumento do ângulo de entrada da fieira, com ângulos maiores é menor o atrito do material com as paredes da fieira. Esta talvez seja a causa dos melhores resultados de retilidade para maiores ângulos, onde há menor contato da fieira com o material sendo trefilado e desta forma menor atrito. Conforme Campos,⁽⁷⁾ o atrito é danoso durante o processo de trefilação, pois uma elevação em seus níveis pode significar perdas de controle dimensional. Em relação ao comprimento do paralelo, conforme M. Asakawa, Sasaki e Shishido,⁽⁵⁾ um comprimento ótimo do paralelo da fieira melhora a retilidade das barras trefiladas. Analisando individualmente esta característica não foi possível confirmar esta afirmativa, pois apesar do lote 1086126001, produzido com fieira com paralelo de 6,48 mm, ter apresentado um dos melhores resultados de retilidade, o lote 1086126002, produzido com fieira com paralelo de 7,09 mm, não apresentou bons resultados. Desta forma conclui-se que esta característica não pode ser analisada individualmente, pois foi maior a influência do ângulo de entrada da fieira ou da interação entre ângulo de entrada e comprimento do paralelo. Uma melhor análise pode ser feita através da comparação entre os lotes 1086126002 e 1086126003, para os quais foi proposto (Tabela 1), ângulo de entrada de 12° e comprimento de paralelo de 4,46 mm, para o lote 1086126003 e de 7,09 mm, para o lote 1086126002, sendo que os resultados de retilidade das barras, considerando o desvio padrão, foram

muito similares entre eles. Desta forma, podemos concluir que o ângulo de entrada da fieira é o principal responsável pela retilidade das barras treiladas.

4.1.2 Empenamento após têmpera

Não foi encontrado na literatura nenhum trabalho que relacionasse as características do processo de treilação combinada ou as características das barras treiladas com o processo de têmpera superficial por indução, sendo este ainda um campo aberto a estudos mais profundos. Dos dados obtidos neste trabalho pode-se observar uma forte relação entre a retilidade das barras treiladas e a retilidade das hastes de amortecedor após o processo de têmpera superficial por indução (Figura 4).

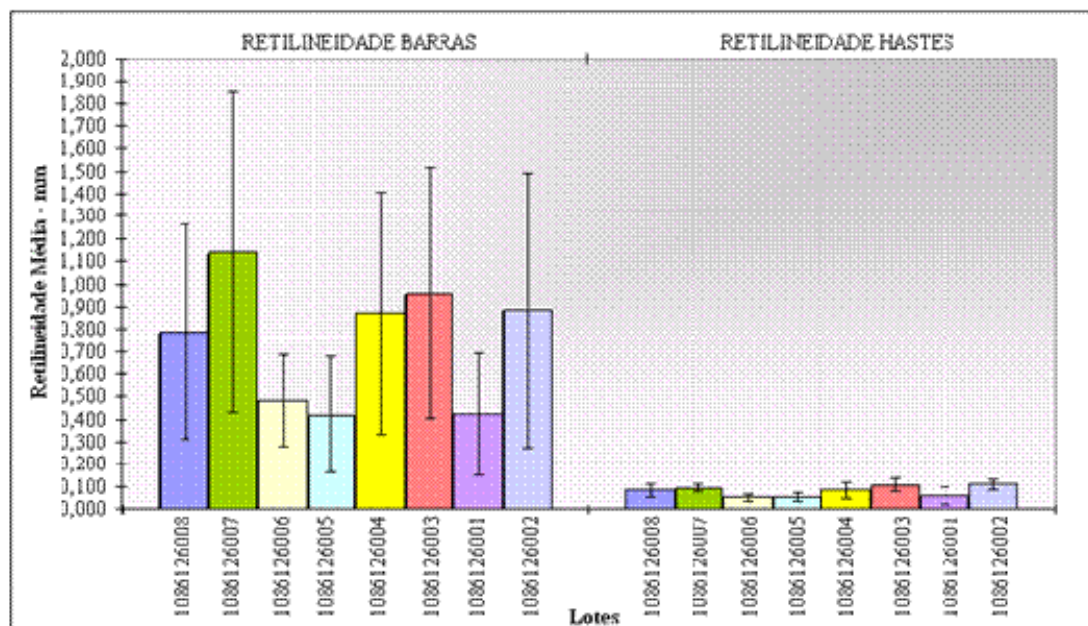


Figura 4. Retilidade das barras e retilidade das hastes.

4.1.3 Dimensional

Os lotes 1086126005 e 1086126006, que apresentaram menor variação entre o diâmetro do paralelo da fieira e o diâmetro final das barras treiladas (médias das medições) foram treilados com fieiras com ângulos maiores (30° e 40° respectivamente). Conforme Dieter,⁽⁶⁾ a maior parte da deformação plástica observada dentro da fieira pode ser atribuída às tensões de compressão impostas ao material, devido ao contato entre a barra e a fieira; e que apesar da deformação cisalhante aumentar com o aumento do ângulo de entrada da fieira, com ângulos maiores é menor o atrito do material com as paredes da fieira. Este conceito pode explicar a menor variação entre o diâmetro do paralelo da fieira e o diâmetro final das barras treiladas para maiores ângulos, pois para estes ângulos houve menor contato da fieira com o material sendo treilado e desta forma menor atrito. Conforme Campos,⁽⁷⁾ o atrito é danoso durante o processo de treilação, pois uma elevação em seus níveis pode significar geração de calor, desgaste da fieira, perdas de controle dimensional e agravamento da heterogeneidade de fluxo devido à heterogeneidade de deformação principalmente na superfície das barras. Conforme Cetlin,⁽⁸⁾ para ângulos baixos de fieira, quando a energia externa para vencer o atrito metal-fieira é grande, decréscimos desse ângulo causam maior heterogeneidade de deformação e não menor. Em relação ao desvio padrão da característica diâmetro pode-se considerar que não houve diferenças significativas entre os lotes, pois as variações entre barras de cada experimento se mantiveram na casa dos milésimos de milímetro,



sendo exceção apenas o lote 1086126007. Porém, cabe aqui uma análise mais aprofundada da influência do comprimento do paralelo. Conforme Asakawa, Sasaki e Shishido,⁽⁵⁾ um comprimento ótimo do paralelo da fieira melhora a tolerância dimensional das barras trefiladas. Analisando em conjunto o desvio padrão da característica diâmetro e a característica ovalização, observa-se que os lotes 1086126001 e 1086126002 foram os que apresentaram os melhores resultados, sendo estes dois lotes produzidos com fieira com os maiores comprimento de paralelo, de 6,48 mm e 7,09 mm respectivamente.

4.2 Propriedades Mecânicas

4.2.1 Ensaio físicos

Conforme Dieter,⁽⁶⁾ devido ao aumento da deformação cisalhante na superfície, a resistência ao escoamento e a resistência a tração das barras trefiladas são maiores para fieiras com ângulos de entrada maiores. Com base nos resultados não foi possível confirmar esta afirmativa, pois os lotes 1086126001, 1086126005 e 1086126006, produzidos com ângulos de entrada maiores (30°, 30° e 40° respectivamente) não apresentaram diferenças significativas em relação aos demais.

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados apresentados podem-se obter as seguintes conclusões:

- houve uma forte relação entre a retilidade das barras trefiladas e a retilidade das hastes de amortecedor após o processo de têmpera superficial por indução, sendo que melhor retilidade das barras trefiladas implicou em melhor retilidade das hastes de amortecedor após o processo de têmpera;
- fieiras com maior ângulo de entrada (30° e 40°) resultaram em melhores valores de retilidade em comparação às fieiras com ângulos menores (12° e 18°);
- fieiras com maior ângulo de entrada (30° e 40°) geraram barras com menor variação entre o diâmetro do paralelo e o diâmetro final da barra;
- fieiras com maior comprimento de paralelo resultaram em melhor tolerância dimensional das barras trefiladas, quando analisados o desvio padrão da característica diâmetro e a característica ovalização;
- não se observaram diferenças significativas de retilidade, tanto das barras trefiladas quanto das hastes de amortecedor após têmpera, com a variação do comprimento do paralelo da fieira;
- não foram observadas diferenças significativas entre os experimentos em relação às propriedades mecânicas das barras trefiladas; e
- experimentos realizados com dois passes de trefilação não foram satisfatórios do ponto de vista da retilidade das barras, da retilidade das hastes de amortecedor após o processo de têmpera superficial e quanto à tolerância dimensional das barras trefiladas.

Agradecimentos

A gerência da ArcelorMittal Sabará pelo financiamento do trabalho.

A Universidade Federal de Minas Gerais pelo auxílio técnico.

A equipe administrativa, de produção e de manutenção da ArcelorMittal Sabará, pelas discussões técnicas, tempo de máquina disponibilizado para os experimentos, pelo apoio nas medições realizadas nas barras trefiladas e pelo acompanhamento durante os testes práticos no fabricante de amortecedores.

A toda a equipe da Belgo Bekaert Arames pela fabricação e medição das feiras e pelos ensaios mecânicos.

REFERÊNCIAS

- 1 Akiyama, M., Kuboki, T., Neishi, Y., Kuroda, K. Effect of die geometry on residual stress level present after bar drawing. *Ironmaking and Steelmaking*, v.28, n.1, p65-71, 2001.
- 2 Nunes, R. M. Análise de tensões residuais no processo de trefilação combinada do aço AISI 1048 visando minimizar distorções pós processamento. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008. 110p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica).
- 3 Cetlin, P. R., Helman, H. Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais. 2ª Ed. São Paulo: Artliber Editora, 2005. 260p.
- 4 Centro Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo. Trefilação.
ftp://ftp.cefetes.br/Cursos/EngenhariaMetalurgica/Marcelolucas/Disciplinas/Conformacao/Trefilacao/apres_Trefilacao.pdf
- 5 Asakawa, M., Sasaki, W., Shishido, S. Effect of die approach geometry and bearing length on residual stress after bar drawing. *Wire Journal International*, p68-72, out. 2000.
- 6 Dieter, G.E.. *Mechanical Metallurgy*. 1ª Ed. McGraw-Hill Book Company, 1961.
- 7 Campos, H. B. Estudo da Deformação na Trefilação em Passe Simples de Barras de Cobre. Belo Horizonte: UFMG, 1993. 368p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica) – Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais, 1993.
- 8 Cetlin, P. R. Propriedades Mecânicas à Tração de Barras e Arames de Seção Circular obtidos por Trefilação. Belo Horizonte: UFMG, 1983. 219p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica) – Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais, 1983.