



# ESTUDO E MINIMIZAÇÃO DE EMPENAMENTOS DECORRENTES DE TRATAMENTOS TÉRMICOS DE ALÍVIO DE TENSÕES E TÊMPERA POR INDUÇÃO EM HASTES DE AÇO AISI1045<sup>1</sup>

Rafael Menezes Nunes<sup>2</sup>  
 Alexandre da Silva Rocha<sup>3</sup>  
 Thomas Hirsch<sup>4</sup>

## Resumo

A distorção de forma e o empenamento de componentes mecânicos que ocorrem durante a fabricação constituem um sério problema enfrentado pela indústria metal-mecânica. Muitas vezes as causas deste tipo de problema são associadas ao tratamento térmico onde tenta-se implementar melhorias, ou seja, o processo não é visto como um todo. Já está bem estabelecido na literatura que problemas de distorção envolvem toda cadeia de produção e que cada etapa gera um “potencial de distorção” liberado durante o aquecimento do material, causando distorções indesejadas. Neste trabalho, avaliou-se uma rota de fabricação de hastes de aço AISI 1045 envolvendo os processos de trefilação, alívio de tensões e têmpera por indução. Após um estudo detalhado, variou-se 5 parâmetros do processo, sendo eles: corrida, ângulo de fieira, ângulo de endireitamento, temperatura de alívio de tensões e profundidade de camada temperada. Após as etapas de tratamento térmico avaliou-se a distorção de forma, utilizando-se um equipamento de medição por coordenadas. Os dados obtidos foram analisados utilizando-se o software Minitab® através da montagem de uma matriz DoE (*Design of Experiments*). A partir dos resultados obtidos, avaliou-se quais etapas do processo induzem maior “potencial de distorção” nos componentes durante as diversas etapas do processo. Dados preliminares apontam a corrida e o ângulo de fieira como as etapas do processo que induzem maior potencial de distorção.

**Palavras-chave:** Têmpera por indução; Aço AISI 1045; Matriz DoE; Distorção de forma; Tensões residuais.

## UNDERSTANDING AND MINIMIZING DISTORTION DUE TO STRESS RELIEF AND INDUCTION HARDENING IN AISI1045 STEEL RODS

### Abstract

Shape distortions and bending are a serious problem in the metalworking industry, distortion due to heat treatment is responsible for additional and cost machining operations. Minimizing or even avoiding heat treatment distortion is one of the key factors to minimize production costs. In the past investigations had focused on single effects or isolated parameters steps in a manufacturing chain. It is well established now that each step of the process chain generates a “distortion potential” and a new global approach, treating distortion as a system attribute, analyzing the entire manufacturing chain from steelmaking to heat treatment process is necessary. The main idea of distortion engineering is that all steps of the manufacturing chain together contribute to the final distortion behavior. In this work, a steel route of combined cold-drawing process to induction hardening of AISI 1045 steel bars was investigated. The identification and interaction between factors on distortion behavior was carried out using statistical analysis, with the aid of DoE (Design of Experiments). For the DOE method the number of causes that can be considered has 5 parameters of the process, including: different batches, drawn angle, PERC angle, stress relief temperature and induction hardening depth.

**Key words:** Induction hardening; Design of Experiments; Shape distortions; Residual stress.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.*

<sup>2</sup> *Doutorando do Laboratório de Transformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. rafael.nunes@ufrgs.br*

<sup>3</sup> *Prof. Dr. Eng. do PPGEM – UFRGS e pesquisador do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da Escola de Engenharia da UFRGS, Brasil. alexandre.rocha@ufrgs.br*

<sup>4</sup> *Priv Doz. Dr. Ing., IWT – Stiftung Institut fuer Werkstofftechnik – Bremen - Germany*



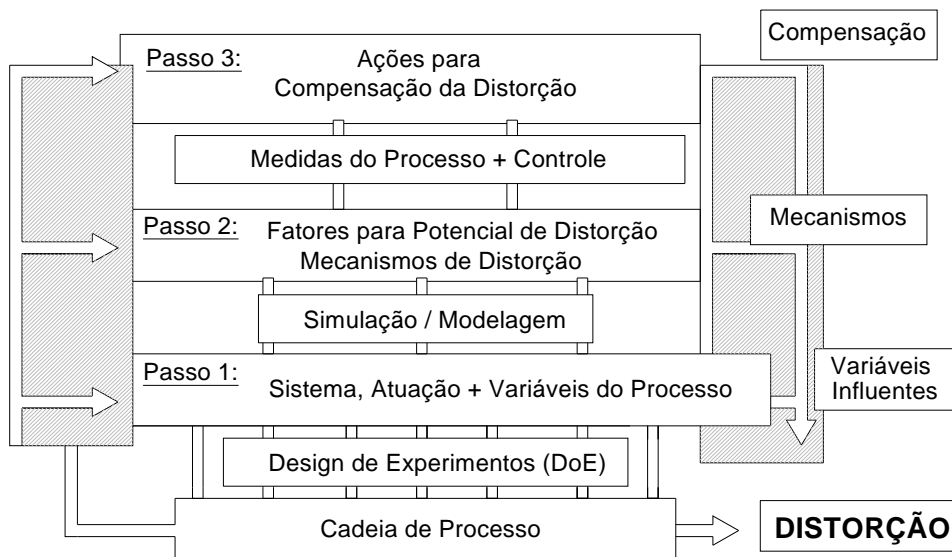
## 1 INTRODUÇÃO

A nova realidade do mercado, aliada à modernização dos processos industriais e à forte competitividade, para se obter um produto com baixo custo e de qualidade, exercem uma pressão para que sempre se busque um conhecimento profundo e detalhado das rotas envolvidas em um processo de fabricação. O conhecimento de fatores que alteram as propriedades dos produtos semiacabados durante a fabricação é o primeiro passo para a minimização de custos e para a melhoria da qualidade do produto final. A partir do controle de parâmetros de processo, pode-se obter um produto com as propriedades desejadas evitando perda de matéria-prima com produtos não conformes. Neste quadro, as distorções de forma e os empenamentos constituem um sério problema enfrentado pela indústria metal-mecânica. Muitas vezes este tipo de problema é abordado com melhorias apenas no tratamento térmico, ou seja, o processo não é visto como um todo. Já foi comprovado por diversos autores que todas as etapas do processo podem gerar um “potencial de distorção” e este é aliviado, geralmente, em etapas onde há usinagem e/ou tratamento térmico, ou seja, em etapas onde há redistribuição ou relaxação de tensões residuais.<sup>(1,2)</sup> Alguns fatores que causam distorções já foram identificados, tais como: tensões residuais, geometria do componente, distribuição da microestrutura, distribuição dos elementos de liga e histórico mecânico.<sup>(3)</sup> Também é bem estabelecido que alguns fatores influenciam o controle dimensional durante o tratamento térmico, como o aquecimento e resfriamento não uniformes e a distribuição de tensões residuais no componente.

A norma EN 10052 define distorção como sendo qualquer mudança de forma e/ou dimensão ocorrida durante o tratamento térmico. Apesar de esta definição descrever apenas o tratamento térmico, qualquer etapa de um processo pode ou poderá causar distorção em componentes mecânicos.<sup>(4)</sup>

Atualmente, a importância da análise das distorções como uma propriedade do sistema tem ganhado forte atenção e começou a ser reconhecido como um caminho para a melhoria dos processos de manufatura.<sup>(5-7)</sup> Estas distorções são tratadas como um atributo do sistema, e cada etapa do processo de fabricação gera um “potencial de distorção”.

O primeiro passo para a melhoria do processo é determinar as variáveis que causam distorção ao longo da rota de fabricação. O segundo passo é a análise do processo através de uma matriz estatística contendo os principais parâmetros a serem investigados. O método aceito para determinar a combinação destes fatores é o Design de Experimentos (DoE), onde os resultados experimentais obtidos serão utilizados para identificar quais passos e parâmetros exercem maior influência na distorção.<sup>(8,9)</sup> Após o planejamento estatístico do experimento, o próximo passo é o modelamento (simulação) do processo. Nesta etapa os possíveis mecanismos da distorção serão identificados. Finalmente depois de identificados dentre todos os parâmetros e variáveis do processo aqueles que alteram o potencial de distorção do material, serão realizadas ações para compensar este potencial de distorção, minimizando-o. Esta metodologia é mostrada na Figura 1.



**Figura 1** – Metodologia da engenharia de distorção.<sup>(7)</sup>

O Planejamento de Experimentos (Design of Experiments, DoE) é uma técnica utilizada para definir quais dados, em que quantidade e em que condições devem ser coletados durante um determinado experimento, buscando satisfazer dois grandes objetivos: redução do número de testes e a maior precisão estatística possível na resposta.<sup>(10)</sup> A resposta do Design of Experiments determina a relação entre os fatores e as suas interações que afetam o processo. Para o desenvolvimento de um Planejamento de Experimentos na indústria deve-se seguir as seguintes etapas:<sup>(11)</sup>

- caracterização do problema;
- escolha dos fatores de influência e níveis;
- seleção das variáveis de resposta;
- determinação de um modelo de planejamento de experimento;
- condução do experimento;
- análise dos dados; e
- conclusões e recomendações.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

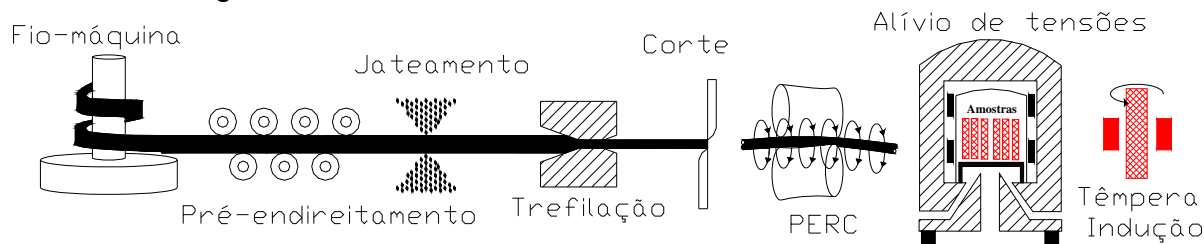
A Tabela 1 mostra a análise química de duas corridas analisadas no material investigado, um aço ABNT 1045.

**Tabela 1** - Composição Química das duas corridas analisadas, aço AISI 1045

Corrida	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%W	%Cu
OP292	0,43	0,24	0,79	0,03	0,02	0,13	0,08	0,03	0,01	0,1
OP677	0,44	0,23	0,66	0,03	0,03	0,09	0,05	0,01	0,02	0,08

A rota de fabricação estudada compreende as etapas de trefilação combinada, alívio de tensões e têmpera por indução. A matéria-prima utilizada no processo de têmpera por indução é proveniente do processo de trefilação. Após o processo de trefilação o fio máquina tem um diâmetro de 20,25 mm, há um corte das barras nas dimensões de 6 m de comprimento e posterior endireitamento e polimento por rolos cruzados (PERC), este endireitamento garante a retinidade da barra. Após o processo de PERC, as barras foram novamente cortadas com 200 mm de

comprimento utilizando-se uma serra fita. Realizou-se um alívio de tensões em vácuo, seguindo-se do tratamento térmico de têmpera por indução, conforme mostrado na Figura 2.



**Figura 2** – Rota de processo analisada.

A partir das características do processo e resultados preliminares de várias pesquisas,<sup>(12-15)</sup> definiu-se os parâmetros de estudo e montou-se a matriz DoE do processo utilizando-se o software Minitab®, versão 16. Os principais parâmetros a serem estudados durante a rota de fabricação foram:

- Corrida – OP292 e OP677;
- Ângulo de fieira - 15° e 20°;
- Ângulo de “PERC” - 16° e 18°;
- Temperatura de alívio de tensões - 500°C e 600°C;
- Profundidade de camada temperada por indução – 0,63 mm e 1,21 mm.

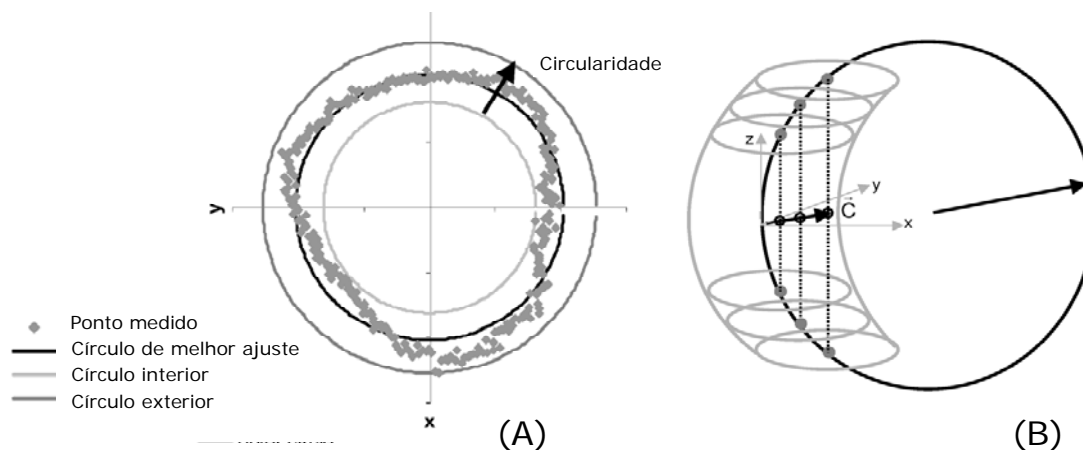
Na Tabela 2 são mostrados os parâmetros do processo que foram estudados durante a rota de fabricação em função de cada corrida analisada, para cada conjunto de parâmetros foram analisadas três amostras.

**Tabela 2** – Variáveis estudadas na rota de fabricação para cada corrida analisada

Corrida	Ângulo fieira	Ângulo PERC	Alívio de tensões	Camada temperada
OP292	15°	16°	500°C	0,63mm
OP292	20°	16°	500°C	0,63mm
OP292	15°	18°	500°C	0,63mm
OP292	20°	18°	500°C	0,63mm
OP292	15°	16°	600°C	0,63mm
OP292	20°	16°	600°C	0,63mm
OP292	15°	18°	600°C	0,63mm
OP292	20°	18°	600°C	0,63mm
OP292	15°	16°	500°C	1,21mm
OP677	15°	16°	500°C	1,21mm
OP292	20°	16°	500°C	1,21mm
OP677	20°	16°	500°C	1,21mm
OP292	15°	18°	500°C	1,21mm
OP677	15°	18°	500°C	1,21mm
OP292	20°	18°	500°C	1,21mm
OP677	20°	18°	500°C	1,21mm
OP292	15°	16°	600°C	1,21mm
OP677	15°	16°	600°C	1,21mm
OP292	20°	16°	600°C	1,21mm
OP292	15°	18°	600°C	1,21mm
OP677	15°	18°	600°C	1,21mm
OP292	20°	18°	600°C	1,21mm
OP677	20°	18°	600°C	1,21mm

A análise da distorção é um passo importante na determinação de quais fatores do processo são responsáveis pelas distorções de forma. Após as etapas de “PERC”, de alívio de tensões e de têmpera por indução realizou-se uma análise dimensional utilizando-se um equipamento de medição tridimensional da marca Zeiss® – modelo Contura G2. A medição baseou-se na realização de 12 circunferências ao longo da

amostra de 200mm de comprimento em posições específicas. Após cada medição, avaliou-se os centros destas circunferências no sistema de coordenadas e posteriormente plotou-se um vetor unindo-se todos os centros, a projeção deste vetor no plano da base do cilindro definiu o vetor distorção, conforme mostrado na Figura 3. Após a realização do tratamento térmico de indução na amostra, repetiu-se o procedimento de medição nos mesmos pontos, determinando o vetor distorção após o tratamento. A comparação destes dois vetores indicou um vetor distorção. A partir do cálculo do vetor distorção os dados obtidos foram avaliados utilizando-se a ferramenta estatística DoE.



**Figura 3** – (A) cálculo da circularidade, (B) projeção dos planos X-Y resultando em um vetor distorção.<sup>(2)</sup>

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

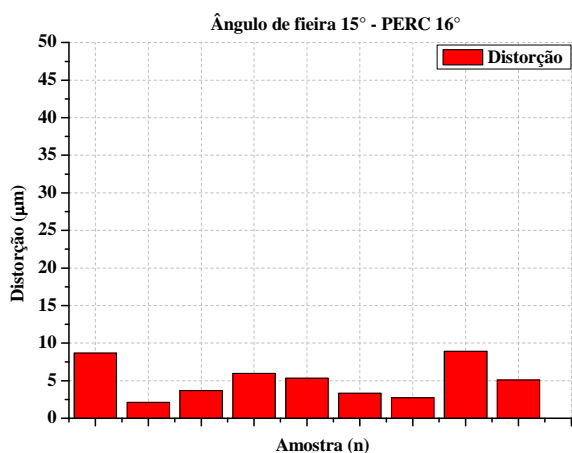
Nas seções 3.1, 3.2 e 3.3 são apresentados os resultados obtidos na análise de distorção para os diversos parâmetros estudados, conforme a tabela 2. Investigaram-se os cinco fatores agrupados da seguinte forma:

- *Ângulo de ferramenta* – analisou-se os ângulos de fieira e PERC, mantendo-se constante o fator corrida, OP292.
- *Corrida* – analisou-se as duas corridas avaliando-se valores médios de distorção após o PERC, para cada parâmetro estudado.
- *Tratamentos térmicos* – analisou-se o alívio de tensões e a têmpera por indução avaliando-se as médias do vetor distorção, após cada etapa de tratamento térmico.

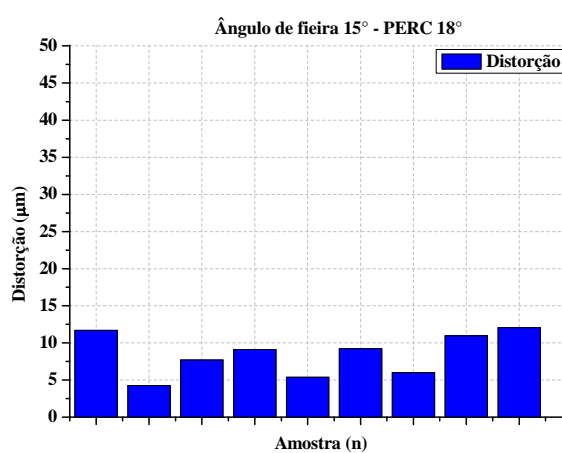
#### 3.1 Fator Ângulo de Ferramenta (Fieira e “PERC”) para a Corrida OP292

Nas Figuras 4, 5, 6 e 7 são mostradas as avaliações dimensionais da matéria-prima após o processo de trefilação para um conjunto de amostras. Variaram-se ângulos de duas ferramentas durante o processo de fabricação, sendo eles: ângulo de fieira 15° e 20°, e ângulo de “PERC” 16° e 18°. Comparando-se os resultados apresentados na figura 4 com a figura 6 e os resultados apresentados na figura 5 com a Figura 7, observa-se que o ângulo de fieira exerce alta influência na distorção de forma após o processo de trefilação. Comparando-se as médias de valores para o ângulo de trefilação de 15° e 20°, nota-se que o ângulo de 15° induz menos distorção ao final do processo de produção, comparando-se os resultados com os obtidos para o ângulo de 20°. Este fato pode estar relacionado à distribuição de

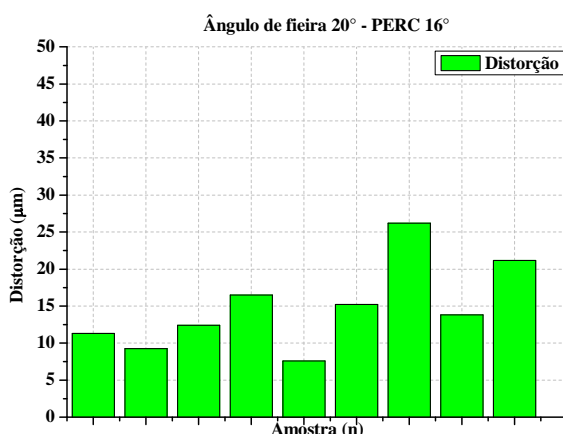
deformações e de tensões residuais influenciadas pela trefilação. Sabe-se que o ângulo de trefilação tem forte influência na distribuição de deformações e consequentemente na magnitude de tensões residuais após o processo.<sup>(14)</sup>



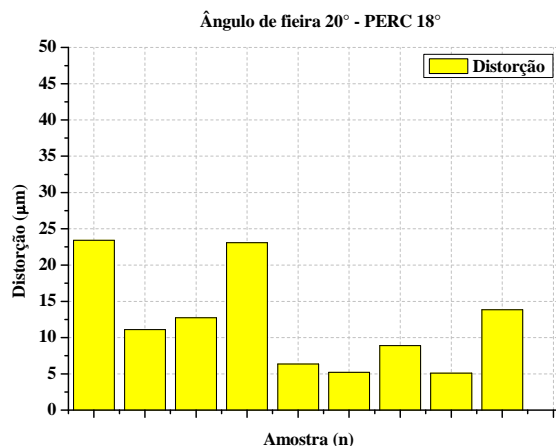
**Figura 4** – Análise dimensional da matéria-prima, barra trefilada 15° – “PERC” 16°.



**Figura 5** - Análise dimensional da matéria-prima, barra trefilada 15° – “PERC” 18°.



**Figura 6** - Análise dimensional da matéria-prima, barra trefilada 20° – “PERC” 16°.

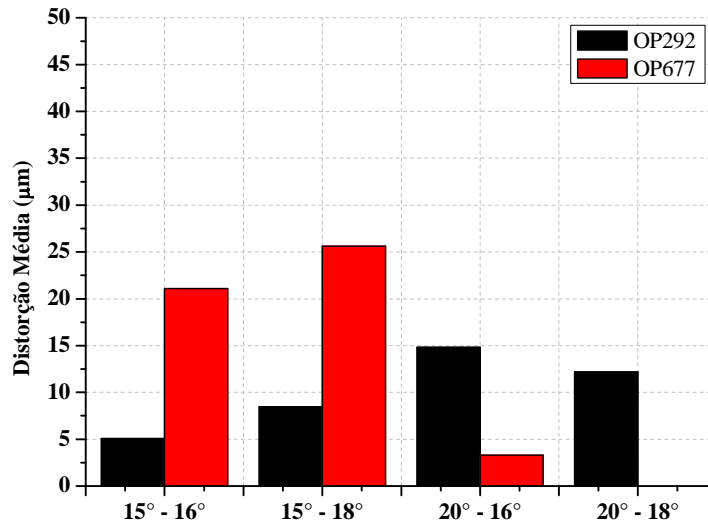


**Figura 7** - Análise dimensional da matéria-prima, barra trefilada 20° – “PERC” 18°.

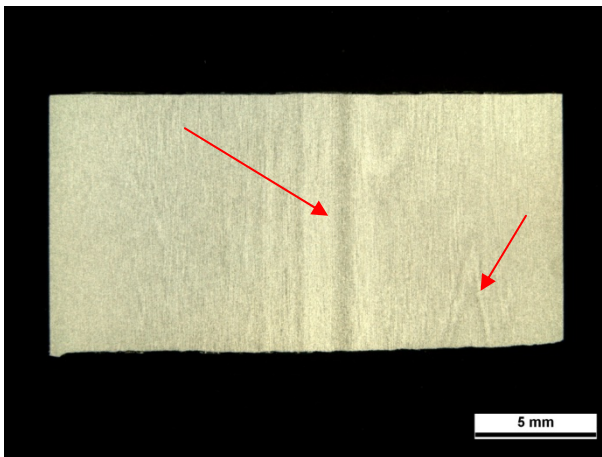
### 3.2 Fator Corrida

A Figura 8 mostra as médias de empenamento para duas corridas distintas, após o processo de polimento e endireitamento (“PERC”). Observa-se que há uma grande diferença da magnitude do empenamento para todas as combinações de fatores analisados. Nota-se que na corrida OP677 o ângulo de fieira não foi benéfico ao processo em relação à distorção, após a trefilação, se comparado com a OP292. A explicação para este fato pode ser feita analisando-se a microestrutura das duas corridas e a distribuição de segregações. Na Figura 9 e Figura 10, observa-se que a microestrutura apresentada na corrida OP677 é mais heterogênea em relação ao alinhamento das segregações com o centro da barra e também em relação à distribuição. Assim, durante o processo de trefilação utilizando-se ângulos maiores, menor penetração de deformações,<sup>(13)</sup> haverá uma menor influência da distribuição das segregações nas distorções de forma. Consequentemente a interação de tensões residuais do material antes da trefilação e após a trefilação levaram a um menor “potencial de distorção”. Por outro lado, mesmo tendo este menor “potencial

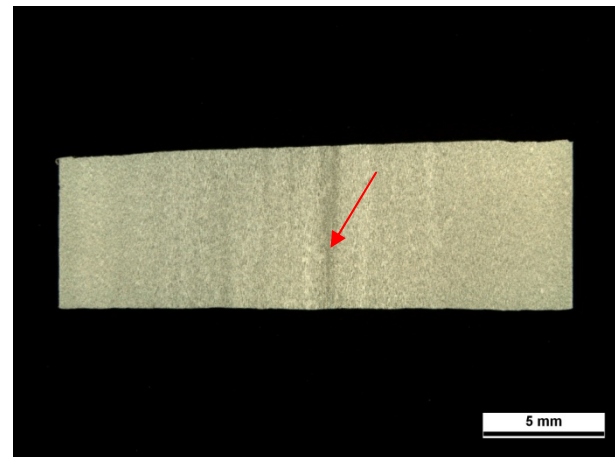
de distorção” durante a trefilação, este potencial poderá ser liberado em uma etapa subsequente do processo, por isso, não se considera este tipo de microestrutura ideal para ter-se um baixo “potencial de distorção”. O fato leva a uma maior distorção durante o processamento do material e principalmente em etapas onde envolvam mudanças de fases (tratamento térmico).



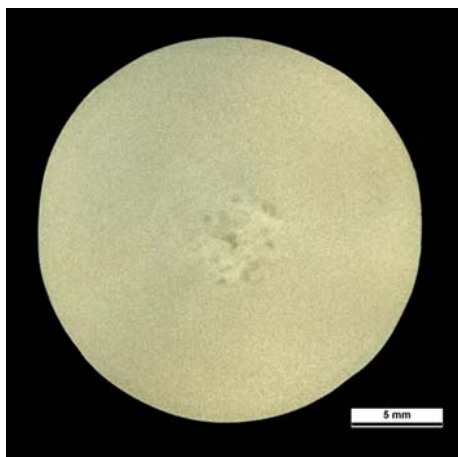
**Figura 8** - Análise dimensional das médias de distorção na matéria-prima em duas corridas distintas.



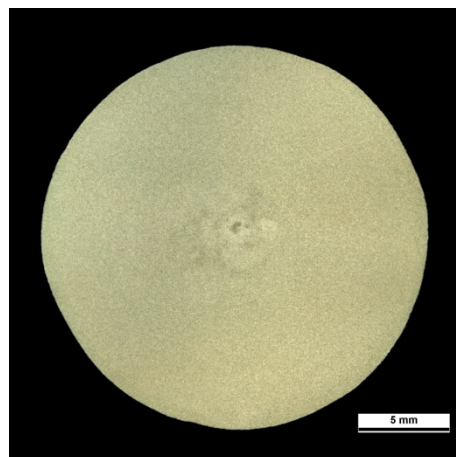
**Figura 9** – Macrografia, corrida OP677, ataque Heyn 10%. Setas apontam heterogeneidades na microestrutura.



**Figura 10** - Macrografia, corrida OP292, ataque Heyn 10%. Seta aponta heterogeneidades na microestrutura.



**Figura 11** – Macrografia, corrida OP677, ataque Heyn 10%.



**Figura 12** - Macrografia, corrida OP292, ataque Heyn 10%.

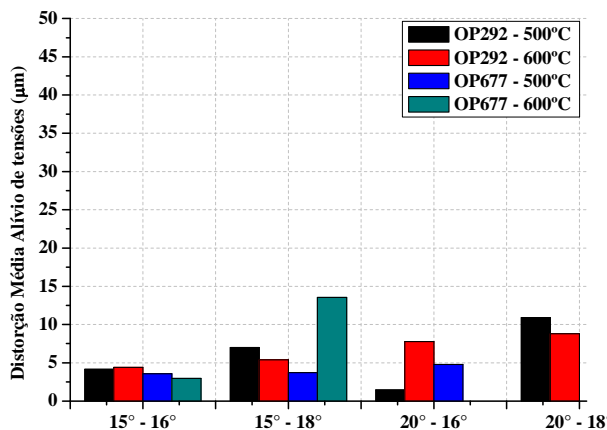
As Figura 11 e Figura 12 mostram macrografias em corte longitudinal das duas corridas OP677 e OP292. Não se observa diferenças significativas em relação ao corte transversal, na OP677 tanto na seção longitudinal quanto na transversal são vistos maiores deslocamentos do centro da barra em relação a distribuição de segregações.

### 3.3 Tratamentos Térmicos – Alívio de Tensões e Têmpera por Indução

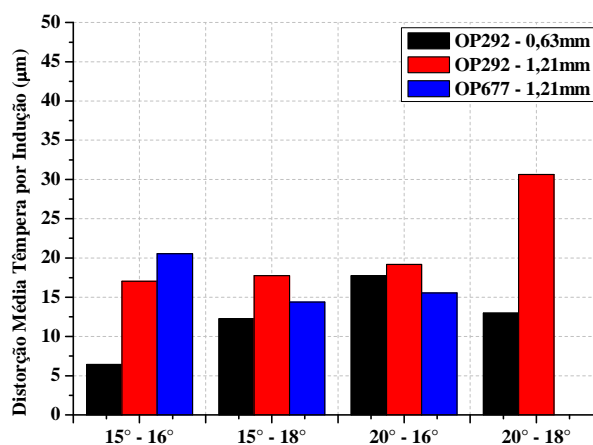
Na Figura 13 são apresentadas as médias de empenamentos após o alívio de tensões para a OP292 e OP677. Comparando-se a temperatura de alívio de tensões de 500°C e 600°C, para cada combinação de parâmetros de ferramenta em uma mesma corrida, observa-se que somente na combinação de ângulos de ferramenta de 20° e 18° há uma diferença mais significativa entre o alívio de tensões a 500°C em relação à 600°C. Comparando-se as duas corridas (OP292, OP677) nota-se que há diferenças significativas utilizando-se os mesmos parâmetros de processamento do material, ou seja, além de parâmetros de ferramental o material está exercendo uma forte influência na distorção.

Na Figura 14 são mostradas as médias dos vetores distorção após a têmpera por indução para duas corridas (OP292 e OP677) e duas profundidades de camada temperada (0,63mm e 1,21mm) para a OP292 e uma profundidade para a OP677. Observam-se diferenças significativas para diferentes camadas utilizando-se ângulos de ferramentas iguais em uma mesma corrida. Notam-se também diferenças significativas entre as duas corridas, indicando que há diferenças na microestrutura, como demonstrado nas Figura 9 e 10. Este comportamento mostra que fatores do processo, como o controle de segregações durante a etapa siderúrgica é importante e pode refletir-se em etapas posteriores do processo, bem como a profundidade de camada temperada influencia na distorção. Quanto maior a profundidade de camada maior o empenamento.





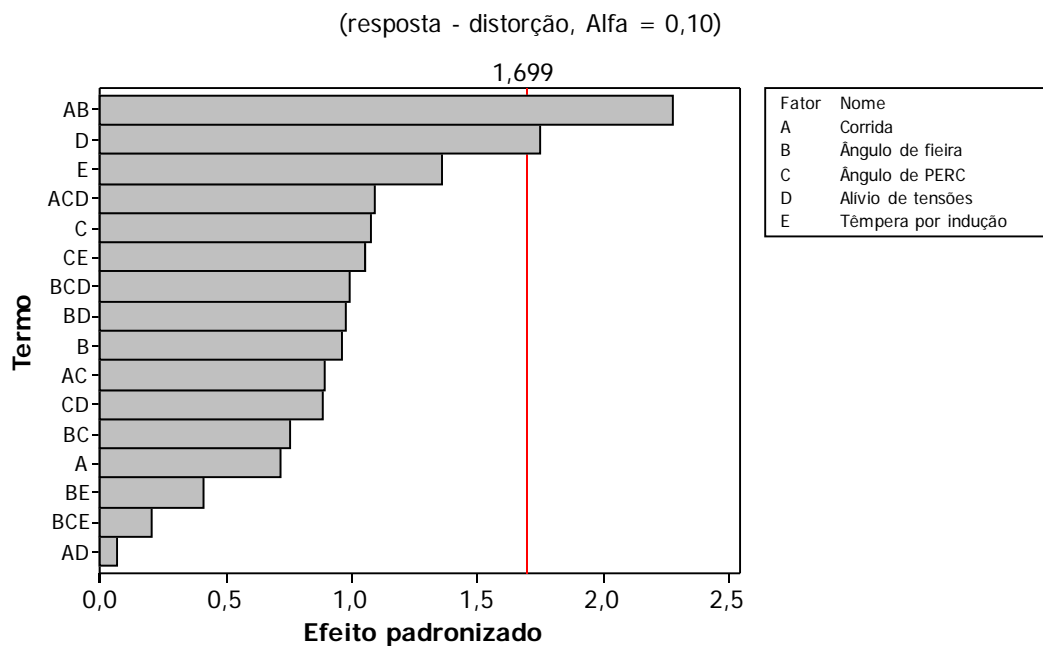
**Figura 13** – Médias dos vetores distorção após alívio de tensões, OP292 e OP677.



**Figura 14** – Médias dos vetores distorção após têmpera por indução, OP292 e OP677.

### 3.3 Análise estatística - DoE

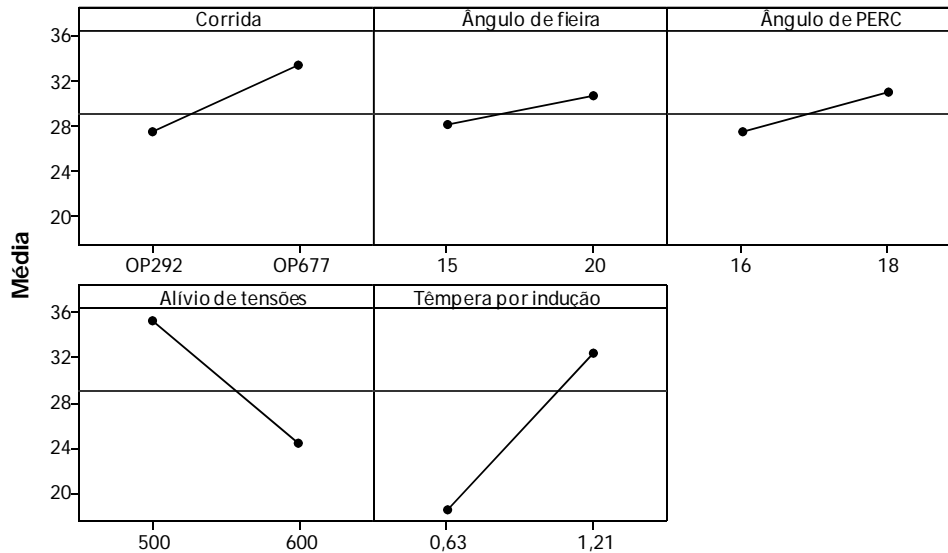
Na Figura 15 é apresentado o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados de todo processo analisado, considerando-se um nível de significância de 90% a interação entre a corrida e o ângulo de fieira é o fator que mais afeta a distorção das barras após a têmpera por indução. Outro fator que afeta significativamente a distorção é a temperatura do alívio de tensões.



**Figura 15** – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados, 90% de confiabilidade.

Na Figura 16 é apresentado o gráfico da interação das variáveis estudadas. Observa-se que a corrida OP292 teve um empenamento médio menor se comparado com a OP677, fato que pode ser explicado pela diferença na microestrutura. O ângulo de fieira de 15° e o ângulo de "PERC" de 16° induzem menor distorção, porém com menor influência do que os outros parâmetros. O alívio de tensões exerce uma alta influência na distorção, sendo a 600°C que ocorre a menor média de empenamento, fato que pode ser explicado pelo alto nível de

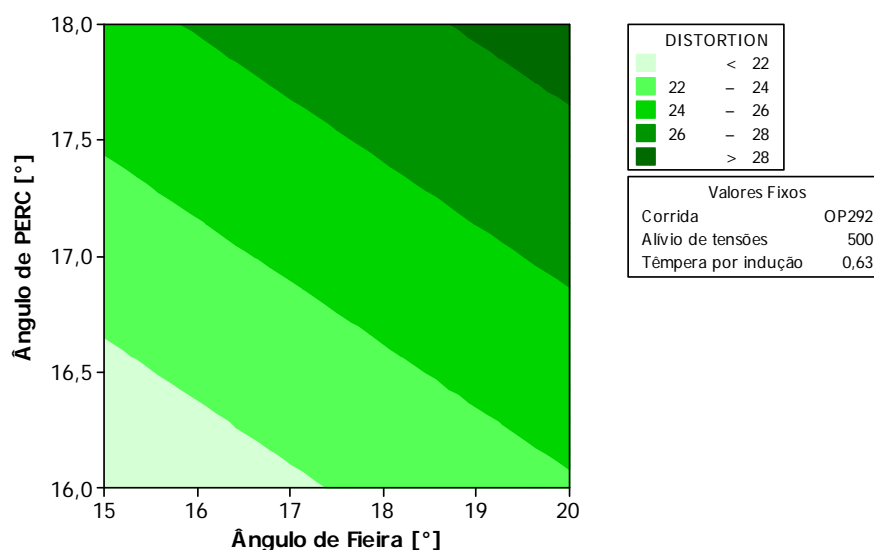
tensões residuais na matéria-prima. Assim, temperaturas maiores de alívio de tensões levam a uma maior relaxação destas tensões residuais. A profundidade da camada temperada é o fator que exerce a maior influência na média do empenamento, comparando-se com os outros fatores analisados, podendo-se observar que camadas menores induzem menores empenamentos médios.



**Figura 16** – Gráfico da interação entre as variáveis estudadas.

A Figura 17 mostra o gráfico de contorno do nível de distorção em relação ao ângulo de “PERC” e ângulo de fieira. Neste gráfico pode-se determinar quais os melhores parâmetros de “PERC” e fieira para se minimizar os níveis de distorção. Nota-se, para os ângulos estudados, que diminuindo os ângulos de fieira e “PERC” diminui o empenamento. Na

Figura 18 é mostrado o gráfico de contorno do nível de empenamento em relação à temperatura de alívio de tensões e a profundidade de camada temperada. Observa-se que camadas menores, independente da temperatura de alívio de tensões, geram menor empenamento.



**Figura 17** – Gráfico de contorno da distorção em relação ao ângulo de “PERC” e ângulo de fieira.

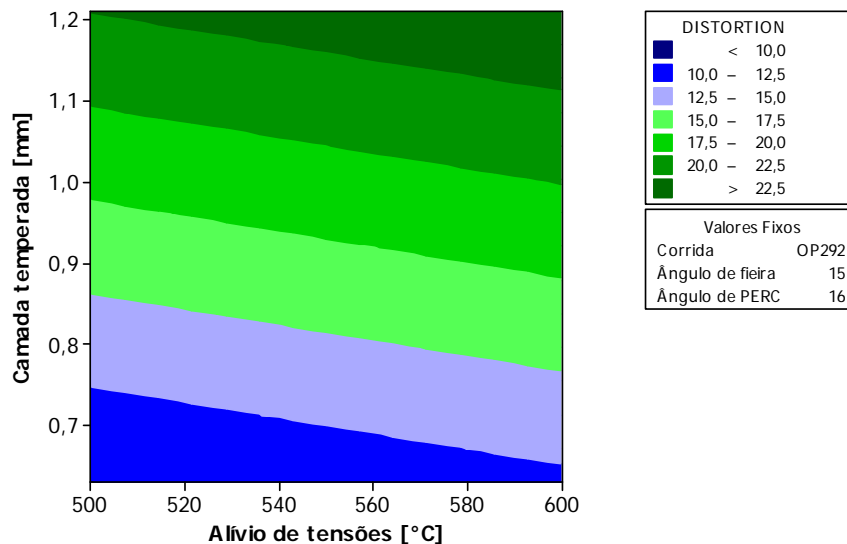


Figura 18 – Gráfico de contorno da distorção em relação ao alívio de tensões e ângulo de fierra.

## 4 CONCLUSÕES

Após os ensaios conclui-se:

- A profundidade de têmpera afeta o comportamento do material em relação à distorção e quanto maior a camada temperada, maior o empenamento.
- Diferenças na distribuição de segregações e microestrutura afetam o empenamento e quanto mais alinhadas as segregações em relação ao centro, melhor o comportamento do material nas diversas etapas do processo.
- Para o processo e os ângulos de ferramenta estudados, uma combinação de ângulos de ferramentas menores, ou seja, maiores penetrações de deformações plásticas são benéficas na distribuição de tensões residuais e conseqüentemente induzem um menor “potencial de distorção”.
- O alívio de tensões diminui o “potencial de distorção” e a temperatura de 600°C foi mais benéfica em relação à distorção.
- Etapas anteriores em uma rota de fabricação induzem “potenciais de distorção” que são aliviados em etapas onde ocorrem tratamentos térmicos.
- A melhor combinação de parâmetros encontrados na rota analisada foi: ângulo de fierra de 15° e o ângulo de PERC de 16°, temperatura de alívio de tensões 600°C e camada temperada de 0,63mm.

## Agradecimentos

Este trabalho é parte dos resultados da Iniciativa Brasil-Alemanha para Pesquisa Colaborativa em Tecnologia de Manufatura – BRAGECRIM. Os autores agradecem a CAPES, CNPq, FINEP e DFG pelo suporte financeiro para a realização deste projeto.

## REFERÊNCIAS

- 1 Hoffmann, F., O. Kessler, et al. (2004). "Distortion engineering" - Distortion control during the production process." Heat Treatment of Metals 31(2): 27-30.



- 2 Thoben, K.-D.; Lübben, T.; Clausen, B.; Prinz, C.; Schulz, A.; Rentsch, R.; Kusmierz, R.; Nowag, L.; Surm, H.; Frerichs, F.; Hunkel, M.; Klein, D.; Mayr, P.: "Distortion Engineering": Eine systemorientierte Betrachtung des Bauteilverzugs. HTM 57 (2002) 4, S. 276-282.
- 3 Frerichs, F.; Lübben, Th.; Hoffmann, F.; Zoch, H.-W.: "Distortion Potential – A systematic way to describe Dimensional Changes". Proceedings of the 14th Int. Metallurgy & Materials Congress, 16.- 18. October 2008, Istanbul, Turkey, pp. 1296 – 1305.
- 4 EN 10052, Vocabulary of heat treatment terms for ferrous products. European committee for Standardization, 1993, p29.
- 5 Lu, J. "Prestress Engineering of Structural Material: A Global Design Approach to the Residual Stress problem". Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. ASM International, Ohio, 2002, p11.
- 6 Klein, D.; Thoben, K.-D.; Nowag, L.; "Using Indicators to Describe Distortion Along a Process Chain". Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 2006, 37, No. 1. p 19-22.
- 7 Zoch H. W., Distortion engineering: vision or ready to application? Proc. 2nd Int. Conf. On Distortion Engineering IDE 2008, 17.-19. September 2008, Bremen, Germany, p. 3-12.
- 8 Kessler O. et al. Experimental Study of Distortion Phenomena in Manufacturing Chains. Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 2006, 37, No. 1. p11-18.
- 9 Lübben, Th.; Zoch, H.-W.: Distortion Engineering - A Systematic Strategy to Control Dimensional Changes. Proceedings of the European Conference on Heat Treatment, May 2008, Verona, Italy. p7-9.
- 10 Montgomery, D. C. (1976). Design and analysis of experiments. New York: Willey.
- 11 Coleman, D. E.; Montgomery, D. C. A systematic approach to planning for a designed industrial experiment. Technometrics, v. 35, n. 1, p. 1-12, Feb. 1993.
- 12 Nunes, R. M. ; M. Metz ; T. K. Hirsch ; Rocha, as . Análise de Tensões Residuais em Barras de Aço AISI 1048 Produzidas por Trefilação Combinada. in: 63 congresso anual da ABM, 2008, Santos. Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008. v. 1. p. 341-350.
- 13 Nunes R. M., Análise De Tensões Residuais No Processo De Trefilação Combinada Do Aço AISI 1048 Visando Minimizar Distorções Pós Processamento. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2008. p110. Advisor: Alexandre da Silva Rocha – PPGEM – UFRGS, Co-Advisor: Thomas K. Hirsch – IWT – Bremen.
- 14 Rocha, A. S., Nunes, R. M., Metz, M., & Hirsch, T. K. (2008). Analysis of the distortion potential in AISI 1048 steel bars induced by a combined drawing-straightening process. 2nd International Conference on Distortion Engineering, (pp. 13-20). Bremen.
- 15 Metz, M., Santos, C., Rocha, A. S. Análise Qualitativa das Tensões Residuais Longitudinais em Barras Trefiladas de Aço SAE 1045 Através do Método Slliting In: 8º Congresso Iberoamericano de Ingenieria Mecanica, 2007, Cusco. V.1.