

FECHAMENTO DA POROSIDADE CENTRAL NA LAMINAÇÃO DE FIO-MÁQUINA ¹

André Luiz Assunção ²
Francisco J. M. Boratto ³
Fábio da Silva Borchardt ⁴
Dagoberto Brandão Santos ⁵

Resumo

O aço na condição lingotado algumas vezes contém vazios, que surgem principalmente por causa da contração do material durante a solidificação e aprisionamento de gases. Geralmente a maior fração de vazio está localizada no centro do material e, muitas vezes, é tão alta que uma porosidade central longitudinal é formada. Foram estudados os efeitos dos parâmetros temperatura de deformação, velocidade de laminação e redução de área no fechamento da porosidade central através de Planejamento de Experimentos. A porosidade central foi artificialmente criada em corpos de prova de seção transversal retangular para laminação em laminador de planos com mesa lisa em laboratório, e em tarugos de aço para laminação em canais em laminador industrial de fio-máquina. Os resultados obtidos em laboratório mostraram a influência da interação entre temperatura, velocidade de laminação e redução de área na laminação de planos, com a melhor condição em alta temperatura, baixa velocidade e alta redução, e foi mais efetivo em aço baixo carbono do que em aço ligado. Na laminação de fio-máquina os resultados também mostraram a influência da interação entre temperatura, velocidade de laminação e redução de área nos canais ovais com a melhor condição em alta temperatura, baixa velocidade e baixa redução de área para o fechamento da porosidade central.

Palavras-Chave: Planejamento de experimento; Porosidade; Laminação.

CLOSURE OF CENTRAL POROSITY IN WIRE ROD ROLLING

Abstract

As-cast billet from continuous casting process may contain voids that appear mainly due to material shrinkage during solidification or gas entrapment. Usually the highest void fraction is located in the center of the material and some times are so high that a longitudinal central porosity is formed. Studies were carried out to verify the effects of deformation temperature, rolling speed and reduction of area in the closure of an artificial central porosity in rectangular cross section specimen, rolled in laboratory flat rolls. For the wire rod rolling, a hole was made in the billet and the same parameters were studied. Design of Experiments was carried out to know the best condition in the closure of central porosity. Experiment results have shown the influence of temperature, rolling speed and reduction of area in the closure of central porosity in flat rolling, and the best conditions were at high temperature, low speed and high reduction, and it was more effective in low carbon steel than alloy steel at the same conditions. For the wire rod rolling, the results have shown the influence of the same parameters, with the best condition for the closure of central porosity at high temperature, low speed and low reduction in the oval groove rolls.

Key words: Design of experiments; Porosity; Rolling.

¹ *Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

² *Mestre, Engenheiro Metalurgista. ArcelorMittal Monlevade.*

³ *PhD, Físico. ArcelorMittal Monlevade.*

⁴ *M.Sc., Engenheiro Metalurgista. ArcelorMittal Monlevade.*

⁵ *Doutor, Professor Associado, DEMET/UFMG.*

1 INTRODUÇÃO

O aço, na condição lingotado, algumas vezes contém vazios que surgem principalmente devido à contração do material durante a solidificação ou aprisionamento de gases, e geralmente a maior fração de vazio está localizada no centro do material, e pode ser tão alta que um poro central longitudinal é formado. Para obter um material isento de porosidade após a laminação, a eliminação dos poros deve incluir dois passos: primeiramente, o fechamento do poro, e segundo, a soldagem ou ligação das superfícies internas do poro.⁽¹⁻³⁾

Vários estudos foram realizados em laminação e forjamento de lingotes e placas para se avaliar os efeitos das variáveis de ambos os processos no fechamento de poros. Estes estudos incluíram deformação em escala piloto em laboratório,^(1,3-5) deformação em escala industrial⁽⁶⁻⁸⁾ e simulação por elementos finitos.^(1,2,9,10) Os principais parâmetros que influenciam no fechamento de poros são: redução de área, temperatura, velocidade de laminação, relação entre o diâmetro do cilindro e altura inicial do material, gradiente de temperatura entre superfície e centro do material, formato do cilindro, e propriedades do material como alargamento e encruamento.

O objetivo deste trabalho foi estudar a influência da temperatura de deformação, redução de área e velocidade de laminação no fechamento de uma porosidade central, artificialmente criada, nas condições de deformação em cilindros de mesa lisa (laminação de planos) e deformação em cilindros com canais (laminação de fio-máquina).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Foram utilizados aço baixo carbono e aço ligado, produzidos na ArcelorMittal Monlevade, e cujas composições químicas típicas são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química dos aços baixo carbono e ligado (% em peso).

AÇO	C	Mn	Cr
Baixo Carbono	0,05	0,38	–
Ligado	0,55	0,67	0,66

Para os experimentos no laminador de planos, corpos de prova de seção retangular e com furo central criado artificialmente foram usinados a partir de tarugos dos dois aços. A dimensão do corpo de prova foi 70 x 15 x 100 mm (Largura x Espessura x Comprimento), e do furo central foi 2,5 mm de diâmetro e 50 mm de profundidade. Uma rolha metálica foi utilizada para fechar a extremidade do furo para se evitar oxidação de sua superfície interna durante o aquecimento.

Na laminação de fio-máquina, um furo simulando a porosidade central, com 100 mm de profundidade e diâmetro de 26 mm, foi usinado na cauda de tarugo de aço baixo carbono de seção quadrada de 155 x 155 mm. A extremidade do furo foi fechada com uma rolha metálica e soldada para se evitar a oxidação da superfície interna durante o aquecimento no forno.

2.2 Métodos

A metodologia utilizada foi o Planejamento de Experimento (PDE). A laminação em mesa lisa foi realizada no Laboratório de Conformação Mecânica do DEMET/UFMG, em um Laminador Duo à quente, marca FRÖHLING, com cilindros de 200 mm de diâmetro e 250 mm de comprimento da mesa. Para aquecimento dos corpos de prova foi utilizado um forno tipo mufla. Um termopar foi colocado em contato com a superfície do corpo de prova para medir a temperatura superficial. Foi realizado um PDE 2⁴, em um passe de laminação para cada ensaio. Os níveis de cada fator são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Fatores e níveis dos ensaios do Planejamento de Experimento no laminador de planos.

Variável	Nível Baixo	Nível Alto
Temperatura (°C)	950	1050
Redução de área (%)	20%	30%
Velocidade (m/s)	0,10	0,42
Aço	Baixo Carbono	Ligado

Os experimentos na laminação em cilindros com canais foram realizados no laminador de fio-máquina #2 da ArcelorMittal Monlevade. Foram realizados ensaios através de um PDE 2³, utilizando como variáveis: temperatura de laminação medida na entrada da cadeira 3, redução de área nos canais ovais das cadeiras 3 e 5 e velocidade de laminação da cadeira 6. O nível dos fatores foi definido conforme a Tabela 3.

Tabela 3: Fatores e níveis dos ensaios do Planejamento de Experimento no laminador de fio-máquina #2 da ArcelorMittal Monlevade.

Variável	Nível Baixo	Nível Alto
Temperatura (°C)	910	970
Redução de área nas cadeiras 3 e 5 (%)	30%	35%
Velocidade final (m/s)	0,97	1,22

Os tarugos foram aquecidos no forno tipo *walking beam* conforme prática padrão industrial para obtenção da temperatura objetivada no experimento. A temperatura foi medida na superfície do tarugo através de um pirômetro marca IRCON modelo R14C05, instalado na entrada da cadeira 3. A seqüência dos canais nos cilindros da cadeira 1 até a cadeira 6 é caixa-caixa-oval-redondo-oval-redondo. Amostras de 500mm de comprimento foram retiradas da cauda dos tarugos laminados através da tesoura posicionada na saída da cadeira 6.

A porosidade remanescente foi examinada em seção transversal. As amostras foram cortadas dos corpos de prova da laminação de planos e das barras da laminação de fio-máquina, polidas e atacadas com reativo Nital 2% para visualização da porosidade remanescente. As amostras foram então analisadas em lupa estereoscópica, marca WILD, modelo M5, com aumentos de 24x e 12x respectivamente. A área da porosidade foi medida através de Analisador de Imagem QUANTIMET modelo 600HR. A análise estatística dos resultados foi realizada através do programa Microsoft[®] EXCEL 2003, utilizando-se a ferramenta de análise de regressão.

3 RESULTADOS

3.1 Laminação de Planos

A Figura 1 ilustra as micrografias dos poros após a realização dos experimentos conforme condições definidas na Tabela 2. O resumo dos resultados do modelo de regressão escolhido é mostrado na Tabela 4. Pode-se concluir que as variáveis do modelo são significativas e estão relacionadas com a área do poro para um nível de significância de 0,10. A análise de resíduos não evidenciou nenhum padrão de distribuição dos mesmos em relação à área do poro prevista pelo modelo e as variáveis independentes.

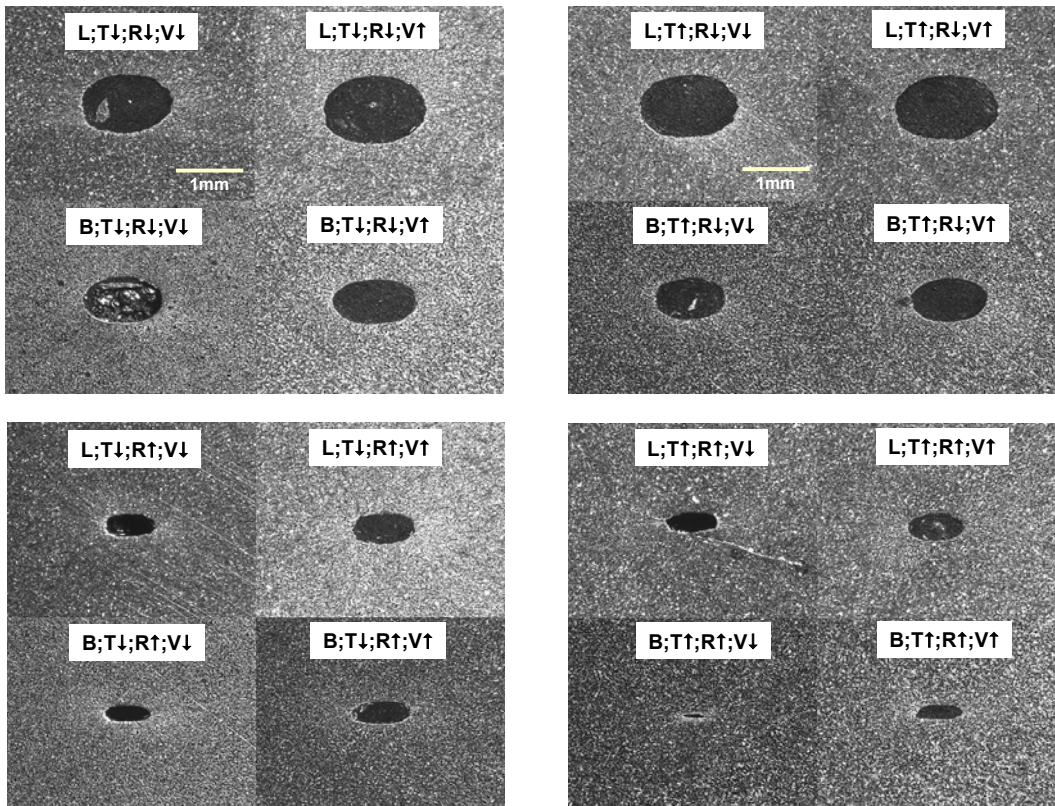


Figura 1: Microestrutura da seção transversal dos corpos de prova da laminação de planos conforme definido na Tabela II. Ataque Nital 2%. Legenda: B: aço baixo carbono; L: aço ligado; T: temperatura; R: redução; V: velocidade. As setas indicam o nível da variável em cada ensaio (↑: alto; ↓: baixo).

O diagrama de respostas da Figura 2 indicou a combinação de maior temperatura, maior redução de área e menor velocidade como mais efetiva para o fechamento da porosidade. O melhor resultado foi encontrado no aço baixo carbono em relação ao aço ligado nas mesmas condições de ensaio.

Tabela 4: Resumo dos resultados da regressão múltipla para o experimento no laminador de mesa lisa. A: Aço ; T: Temperatura ; R: Redução ; V: Velocidade.

Estatística de regressão	
R-Quadrado	0,997
R-quadrado ajustado	0,993
Erro padrão	0,037

ANOVA				
	gl	SQ	MQ	F
Regressão	8	2,9958	0,3745	275,25
Resíduo	7	0,0095	0,0014	
Total	15	3,0053		

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P
Interseção	2,99543	0,23958	12,50	0,000
TEMPERATURA	0,00093	0,00029	3,23	0,014
REDUÇÃO	-0,12062	0,00883	-13,66	0,000
VELOCIDADE	2,45078	0,73654	3,33	0,013
AT	-0,00108	0,00014	-7,79	0,000
AR	0,03157	0,00542	5,82	0,001
AV	-1,30028	0,45298	-2,87	0,024
TRV	-0,00007	0,00003	-2,33	0,053
ATRV	0,00004	0,00002	2,35	0,051

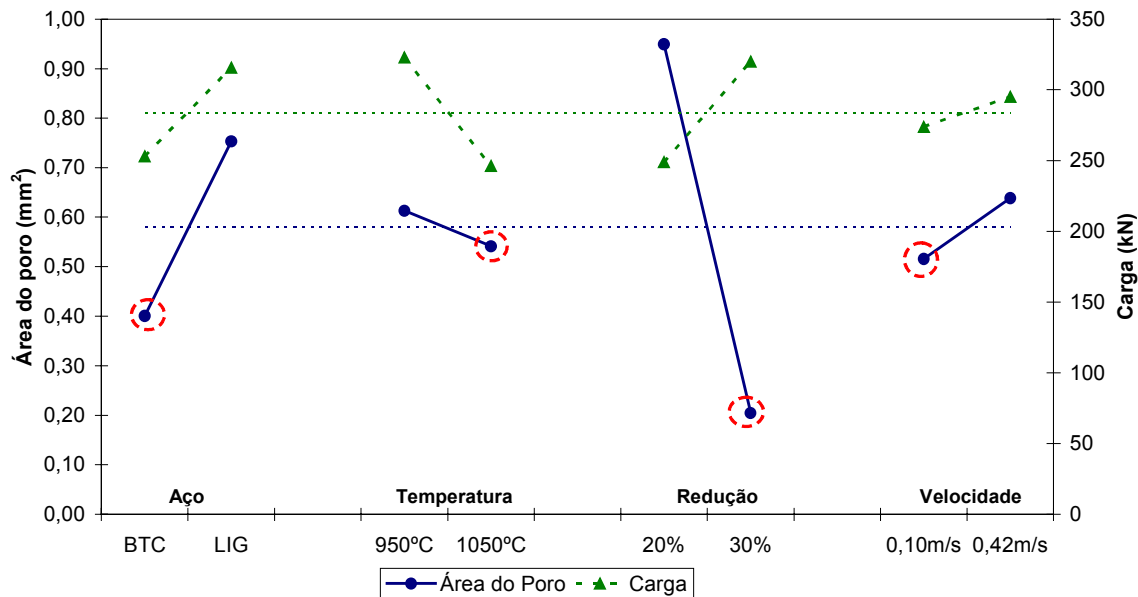


Figura 2: Diagrama de respostas da área do poro e carga de laminação para as variáveis em seus dois níveis. Os círculos tracejados indicam a escolha dos melhores níveis para a menor área do poro remanescente após laminação em mesa lisa. BTC: aço baixo carbono ; LIG: aço ligado.

3.2 Laminação em Canais (Fio-Máquina)

A Figura 3 ilustra micrografias de algumas amostras com porosidade remanescente após a realização dos experimentos, conforme condições definidas na Tabela 3.

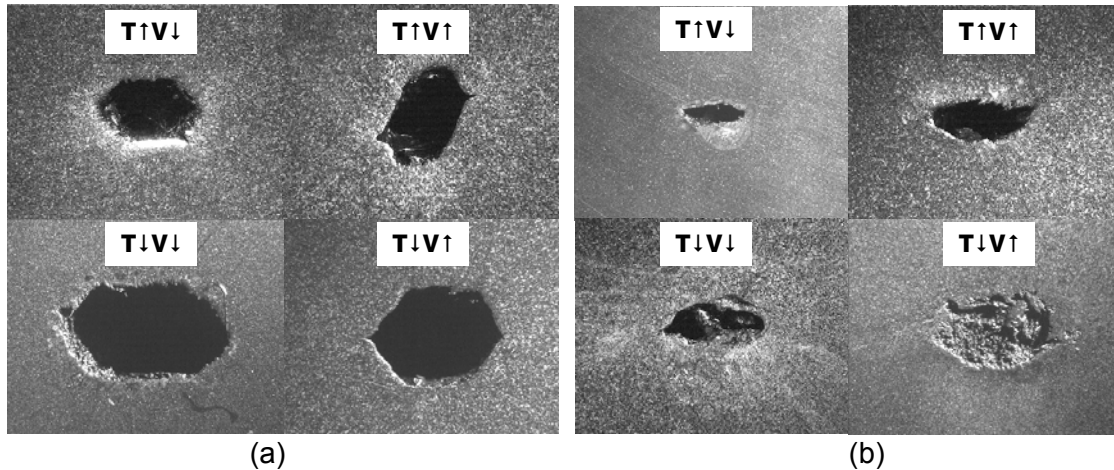


Figura 3: Microestrutura da seção transversal das amostras da laminação em canais conforme condição do ensaio da Tabela III. Ataque: Nital 2%. (a) Redução de 35% nos canais ovais; (b) Redução de 30% nos canais ovais. Legenda: T: temperatura; V: velocidade. As setas indicam o nível de cada variável (↑: alto; ↓: baixo).

O resumo dos resultados do modelo de regressão escolhido é mostrado na Tabela 5. Pode-se concluir que as variáveis do modelo são significativas e estão relacionadas com a área do poro para um nível de significância de 0,05. A análise de resíduos não evidenciou nenhum padrão de distribuição dos mesmos em relação à área do poro prevista pelo modelo e as variáveis independentes (distribuição aleatória dos resíduos). Como o modelo de regressão inclui a interação Temperatura x Redução x Velocidade como significativa, para cada uma destas variáveis os ensaios foram agrupados nos seus níveis e a média das respostas foi calculada dentro dos grupos (níveis). Através da análise dos diagramas de resposta da Figura 4, a combinação entre maior temperatura, menor redução de área nos canais ovais e menor velocidade, mostrou-se como mais efetiva para o fechamento da porosidade central.

Tabela 5: Resumo dos resultados da regressão múltipla para o experimento na laminação industrial em canais oval-redondo (fio-máquina).

<i>Estatística de regressão</i>	
R-Quadrado	0,999
R-quadrado ajustado	0,996
Erro padrão	0,100

ANOVA				
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>
Regressão	5	18,902	3,780	374,938
Resíduo	2	0,020	0,010	
Total	7	18,922		

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Interseção	181,815	11,1208	16,349	0,004
TEMPERATURA	-0,255	0,0109	-23,393	0,002
REDUÇÃO	1,952	0,1141	17,110	0,003
VELOCIDADE	-191,071	9,3129	-20,517	0,002
TV	0,255	0,0103	24,870	0,002
TRV	-0,002	0,0001	-14,550	0,005

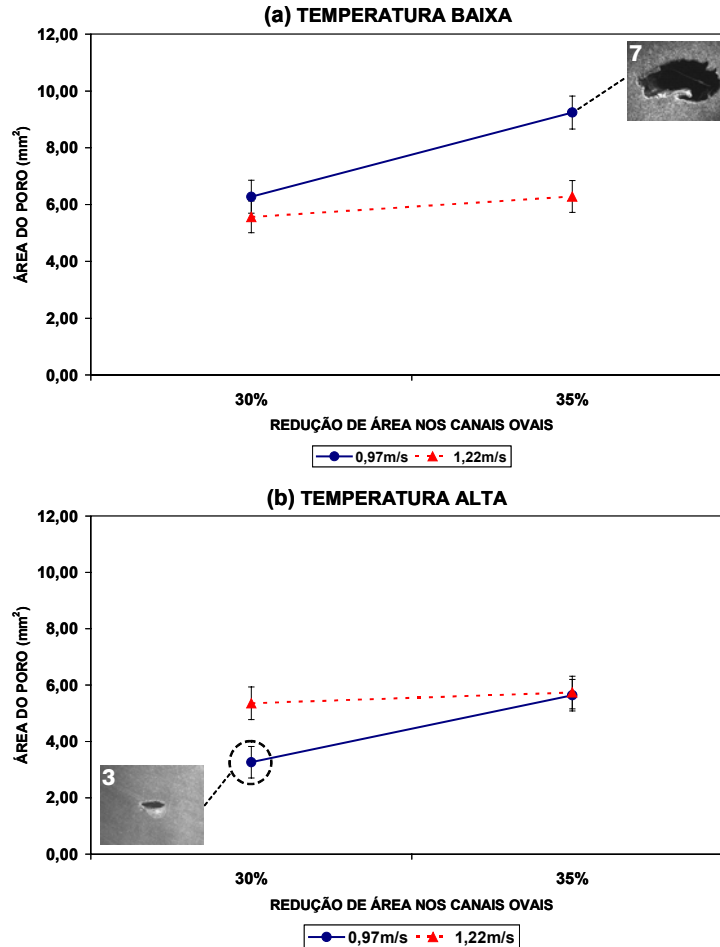


Figura 4: Diagramas de respostas da área do poro para as variáveis em seus dois níveis. (a) Temperatura baixa, e (b) Temperatura alta. O círculo tracejado indica a escolha do melhor nível para a menor área do poro remanescente para laminação em canais (fio-máquina). As linhas verticais em cada ponto representam o intervalo de confiança a 95%.

3.3 Experimento Confirmatório

Para a confirmação da melhor condição, foram selecionados os níveis de cada variável indicados pelo modelo para o completo fechamento da porosidade central em uma experiência final confirmatória no laminador 2 de fio-máquina da ArcelorMittal Monlevade. A temperatura escolhida foi de 1000°C. A velocidade da cadeia 6 foi mantida no nível mais baixo (0,97 m/s). A redução de área nos canais ovais foi reduzida para 27%, ajustando-se a luz dos demais cilindros para se manter as mesmas reduções nos canais redondos. O intervalo de previsão, de acordo com o modelo de regressão, é de -0,65 a 0,90 mm². Como valores negativos não possuem interpretação física, a menor área prevista é zero, ou seja, poro completamente fechado.

A porosidade central foi completamente fechada. Este resultado confirmou a previsão do modelo e as condições definidas pelo PDE como efetivas para o fechamento da porosidade central no laminador de fio-máquina 2 da ArcelorMittal Monlevade.

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Na laminação em mesa lisa, os resultados confirmaram a influência de maior temperatura de laminação, maior redução de área e menor velocidade de laminação no fechamento da porosidade na laminação de planos. Aços com menor teor de carbono possuem uma menor resistência à deformação, e, portanto, apresentam um maior fechamento da porosidade comparado com aços ligados nas mesmas condições de laminação.

Na laminação de fio-máquina, a menor redução de área nos canais ovais foi mais efetiva para o fechamento da porosidade central, ao contrário do que se esperava. Os tarugos laminados nas condições de 35% de redução de área nos canais ovais geralmente apresentaram porosidade com um formato tipo hexagonal com lados retos. Esta forma da porosidade pode ser vista no trabalho de FILIPOVIC.⁽⁸⁾ (Figura 5b). Os tarugos laminados com 30% de redução nos canais ovais não apresentaram um formato típico.

O fato de a menor redução nos canais ovais apresentar melhores resultados no fechamento da porosidade pode ser explicado examinando a Figura 5 do trabalho de FILIPOVIC.⁽⁸⁾ Quando se aumenta a redução no canal oval, a altura do poro neste passe é bastante reduzida, mas a sua largura aumenta drasticamente. Quando o material é deformado no próximo passe redondo, a largura do poro na saída do passe oval torna-se uma altura no passe redondo, devido à deformação se realizar a 90° em relação ao passe anterior. A relação D/h_0 (D é diâmetro de trabalho e h_0 a altura de entrada do material no passe de laminação) é reduzida e conseqüentemente uma pressão menos favorável aparece nas proximidades do poro⁽⁹⁾. Desta forma, o poro abre, aumentando a área do vazio, e a redução da altura do poro no canal redondo será menor.

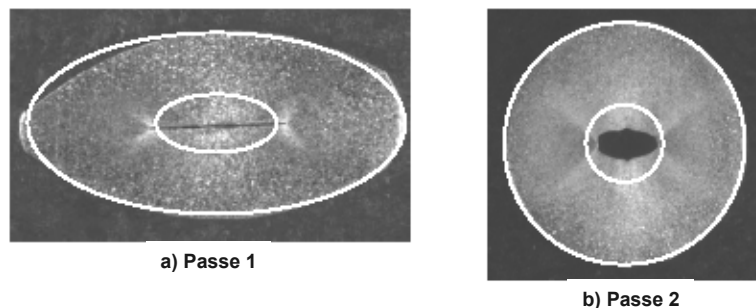


Figura 5: Seções transversais de barras ocas após cada passe (a-b) em uma seqüência oval-redondo. As linhas brancas inseridas ilustram a contração uniforme da cavidade central pela proporção geométrica.⁽⁸⁾

5 CONCLUSÃO

- A interação entre maior temperatura, maior redução de área e menor velocidade de laminação são mais efetivos para o fechamento da porosidade central na laminação em cilindros de mesa lisa (laminação de planos);

- A interação entre maior temperatura, menor redução de área nos canais ovais e menor velocidade de laminação é mais efetiva para o fechamento da porosidade central na laminação em cilindros com canais (laminação de fio-máquina);
- O Planejamento de Experimento e a análise de regressão se mostraram ferramentas estatísticas eficazes na previsão do fechamento da porosidade central, além de indicarem a melhor condição em cada tipo de laminação.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos Engenheiros João Garcia e Gilson Herthel, pelo apoio e por disponibilizar os recursos necessários para realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 WANG, A., THOMSON, P.F., HODGSON, P.D. A study of pore closure and welding in hot rolling process. *Journal of Materials Processing Technology*, n.60, p.95-102, 1996.
- 2 PARK, C.Y., YANG, D.Y. Modeling of void crushing for large-ingot hot forging. *Journal of Materials Processing Technology*, n. 67, p. 195-300, 1997.
- 3 PARK, C.Y., YANG, D.Y. A study of void crushing in large forgings I: Bonding mechanism and estimation model for bonding efficiency. *Journal of Materials Processing Technology*, n. 57, p. 129-140, 1996.
- 4 STAHLBERG, U., KEIFE, H., LUNDBERG, M., A study of void closure during plastic deformation. *Journal of Mechanical Working Technology*, n. 4, p. 51-63, 1980.
- 5 WALLERO, A. Closing of a central longitudinal pore in hot rolling. *Journal of Mechanical Working Technology*, n. 12, p. 233-242, 1985.
- 6 STAHLBERG, U., KEIFE, H. A study of hole closure in hot rolling as influenced by forced cooling. *Journal of Materials Processing Technology*, n. 30, p. 131-135, 1992.
- 7 TAGAWA, H., TANAKA, J., HIRASAWA, T., SUNAMI, E. Effect of rolling practices on annihilation process of micro-porosity in big ingot. *Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity*, n. 62, p. 1720-1733, 1976.
- 8 FILIPOVIC, M. *Evolution of artificial defects during shape rolling*. Estocolmo: Royal Institute of Technology, 2007. 31p. (Dissertação de Mestrado, Metalurgia Mecânica).
- 9 STAHLBERG, U. Influence of spread and stress on the closure of a central longitudinal hole in the rolling of steel. *Journal of Mechanical Working Technology*, n. 13, p. 65-81, 1986.
- 10 PIETRZYK, M., KAWALLA, R., PIRCHER, H. Simulation of the behavior of voids in steels plates during hot rolling. *Steel Research*, v. 66, n. 12, p. 526-529, 1995.
- 11 SMITH, G.V. Properties of metals at elevated temperatures. McGraw-Hill Book Co.,Inc., New York, 1950, p.88.
- 12 KEIFE, H., STAHLBERG, U. Influence of pressure on the closure of voids during plastic deformation. *Journal of Mechanical Working Technology*, n. 4, p. 133-143, 1980.
- 13 WANG, S.M.W. Void closure in ingot forging. Disponível em: http://mfcc.postech.ac.kr/research4_1.htm. Acesso em: 20 de dezembro de 2006.