

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Dissertação de Mestrado

**“FECHAMENTO DA POROSIDADE CENTRAL
NA LAMINAÇÃO DE FIO-MÁQUINA”**

Autor: André Luiz Assunção

Orientador: Prof. Dr. Dagoberto Brandão Santos

Co-orientadores: Ph. D. Francisco José Martins Boratto

Eng. M. Sc. Fábio da Silva Borchardt

Dezembro/2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

André Luiz Assunção

**“FECHAMENTO DA POROSIDADE CENTRAL NA LAMINAÇÃO DE FIO-
MÁQUINA”**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia
Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais em dezembro de
2007

Área de Concentração: Metalurgia Física
Orientador: Prof. Dr. Dagoberto Brandão Santos
Co-orientadores: Ph. D. Francisco José Martins Boratto
Eng. M. Sc. Fábio da Silva Borchardt

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2007

Aos meus amores,
Karina e Estêvão.

Agradecimentos

À ArcelorMittal Monlevade, na pessoa do Gerente Técnico João Garcia, pela oportunidade de realização do trabalho e pela confiança em mim depositada.

Ao Doutor Francisco Boratto e Mestre Fábio Borchardt, pela co-orientação, ensinamentos, amizade sincera, e por acreditarem neste trabalho.

Ao professor Dagoberto, pela orientação e disposição.

Aos colegas Luiz Gonzaga (Ide), Roniery Gomes, Wilson Gouveia, Geraldo Torres, Leandro Marchi, Valamiel, Éder Vilela, Edson Aguiar, Warley Barbosa, Genivaldo Matos, Ronaldo Felisberto, Sebastião Ávila e Júlio Gonçalves pela disposição e colaboração incondicionais para a realização dos experimentos e caracterização das amostras. Sem a ajuda de vocês este trabalho não seria possível.

Aos colegas do Laminador 2, em especial ao senhor Gilson Herthel, por disponibilizar recursos e tempo necessários para realizar os experimentos.

À minha esposa Karina Assunção, por toda a dedicação, paciência, carinho. Enfim, por todo o seu amor. Eu te amarei eternamente.

Ao meu filho amado Estêvão, como eu te desejei! Você é fruto do nosso amor, minha maior recompensa.

Aos meus familiares, em especial minha mãe, que deu toda a estrutura para eu poder chegar até aqui.

E agradeço especialmente a DEUS, fonte de força, fé, sabedoria e paz. Fonte abundante. Autor da minha fé!

SUMÁRIO

SUMÁRIO	v
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE NOTAÇÕES	xii
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Porosidade Central	4
3.1.1 Definição e mecanismos de formação	4
3.1.2 Mecanismos de prevenção e detecção	6
3.1.3 Influência da porosidade no produto final	8
3.2 Fechamento da porosidade na laminação	8
3.3 Influência dos parâmetros de processo	11
3.3.1 Redução de Área	11
3.3.2 Temperatura	17
3.3.3 Velocidade	17
3.3.4 Diâmetro do cilindro/matriz e altura do material	19
3.3.5 Gradiente de temperatura	22
3.3.6 Formato do cilindro e da matriz de deformação	24
3.3.7 Alargamento e encruamento do material	27
3.4 Laminação de Fio-Máquina	29
3.4.1 Fluxo de produção	29
3.4.2 A deformação na laminação de fio-máquina	32
4 METODOLOGIA	34
4.1 Material	34

4.2	Experimentos.....	35
4.2.1	Laminação de Planos.....	36
4.2.2	Laminação em canais (Fio-máquina)	39
4.3	Caracterização da porosidade	40
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1	Laminação de Planos	42
5.1.1	Caracterização da porosidade.....	42
5.1.2	Análise Estatística.....	44
5.2	Laminação em canais (Fio-máquina).....	49
5.2.1	Caracterização da porosidade.....	49
5.2.2	Análise Estatística.....	51
5.2.3	Experiência confirmatória.....	56
6	CONCLUSÕES	58
7	RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS	60
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	61
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	- Seção transversal de um tarugo apresentando porosidade central.....	4
Figura 3.2	- Modelo de solidificação do IRSID. Passos da teoria do mini-lingote.....	5
Figura 3.3	- Representação de uma máquina de lingotamento contínuo com “soft reduction”	6
Figura 3.4	- Amostra de tarugo de seção quadrada de 155 x 155 mm apresentando porosidade central, com o cabeçote do ultra-som posicionado na face superior.....	7
Figura 3.5	- Tela do ultra-som mostrando o pico de indicação da porosidade central em tarugo.....	7
Figura 3.6	- Comparação da tensão de tração entre uma amostra sem vazio e uma amostra com um vazio.....	8
Figura 3.7	- Representação esquemática do modelo teórico para redução de vazio de acordo com o Modo A e Modo B.....	10
Figura 3.8	- Influência da redução na diminuição da fração do vazio para amostras com várias frações iniciais de vazios.....	12
Figura 3.9	- Fechamento de um vazio para estados de tensões determinados para os três programas de laminação considerados.....	13
Figura 3.10	- Influência da redução por passe r_p no tamanho do poro em tarugos de aço quando $R/h_0 = 2,82$ e $a_0/h_0 = 0,11$	14
Figura 3.11	- Poros em amostras de aço, onde em ambos os casos a amostra foi laminada para a mesma redução em altura com diferentes valores de r_p : (a) 12 passes com $r_p = 2,9\%$; (b) 3 passes com $r_p = 10,9\%$	14
Figura 3.12	- Aparência do produto laminado e do vazio: (a) redução de 8%, (b) redução de 18%, (c) redução de 27%. $R = 100\text{mm}$, $V = 5\text{mm/s}$, $h_0 = 10\text{mm}$	15
Figura 3.13	- Distribuição da deformação equivalente em barra cilíndrica laminada em quatro condições de deformação diferentes, conforme mostrado na tabela III.1.....	16

Figura 3.14 - Relação entre a razão de redução total e o índice de defeito relativo em várias práticas de laminação (aço ligado).....	18
Figura 3.15 - Variação do limite de resistência com a taxa de deformação em aço.....	19
Figura 3.16 - Distribuição da tensão hidrostática (σ_H) durante a laminação em deformação plana de uma placa de 20 mm de espessura com raio do cilindro de (a) 19 mm e (b) 125 mm.....	20
Figura 3.17 - Desenho esquemático da distribuição de tensões na abertura entre os cilindros durante a laminação de placa de grande seção..	21
Figura 3.18 - Influência de R/h_0 no tamanho do poro em tarugos de aço quando $r_p = 10,9\%$ e $a_0/h_0 = 0,11$	22
Figura 3.19 - Influência do resfriamento, tabela III.2, na diminuição do poro após uma redução em altura de aproximadamente 18% em laminação plana.....	24
Figura 3.20 - Seções transversais de barras ocas após cada passe (a-h) em uma seqüência oval-redondo. As linhas inseridas ilustram a contração uniforme da cavidade central pela proporção geométrica.....	25
Figura 3.21 - Comparação da configuração da malha e a deformação efetiva entre (a) matrizes planas e (b) com formato em V.....	26
Figura 3.22 - Comparação dos níveis de deformação entre matrizes planas e com formato em V.....	27
Figura 3.23 - Influência do parâmetro d da equação de alargamento de Wusatowski, caracterizando o material laminado, na diminuição da fração de vazio para redução máxima por passe. Os vazios são fechados após o último passe para cada programa de laminação.....	28
Figura 3.24 - Efeito do expoente de encruamento na razão de volume de vazio remanescente.....	29
Figura 3.25 - Fluxo de processo do Laminador 2 de fio-máquina da ArcelorMittal Monlevade.....	31
Figura 3.26 - Capacidade de redução parcial para canais Falso Redondo-Oval e Oval-Falso Redondo em função da deformação total.....	33

Figura 4.1	- Dimensões (em mm) do corpo de prova para a laminação experimental no laminador de planos do laboratório do DEMET/UFMG.....	34
Figura 4.2	- Etapas da preparação do tarugo de aço baixo carbono: (a) Usinagem do furo, (b) Tarugo com furo de 26 mm de diâmetro e 100 mm de profundidade, (c) tarugo fechado com rolha metálica, (d) rolha metálica soldada.....	35
Figura 4.3	- Forno tipo mufla: (a) visão geral e (b) visão interna.....	38
Figura 4.4	- Laminador Duo à Quente utilizado nos experimentos.....	38
Figura 4.5	- Esquema do fluxo de deformação do tarugo no laminador 2 da ArcelorMittal Monlevade, das cadeiras 1 a 6.....	40
Figura 4.6	- Roteiro para a construção do modelo de regressão.....	41
Figura 5.1	- Microestrutura da seção transversal dos corpos de prova da laminação em mesa lisa de acordo com a tabela IV.3. Ataque Nital 2%. Aumento 24X.....	42
Figura 5.2	- Relação entre a área e a razão largura / altura do poro.....	43
Figura 5.3	- Correlação entre a área calculada pelo modelo de regressão e a área medida do poro (laminação de planos).....	45
Figura 5.4	- Relação de resíduos e a área da porosidade calculada pelo modelo de regressão (laminação de planos).....	46
Figura 5.5	- Relação de resíduos e as variáveis do modelo de regressão (laminação de planos).....	47
Figura 5.6	- Diagrama de respostas da área do poro e da 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.....	48
Figura 5.7	- Microestrutura da seção transversal das amostras da laminação em canais. Redução de 35% nos canais ovais conforme condição do ensaio da tabela IV.5. Ataque nital 2%. Aumento 12X.....	49
Figura 5.8	- Microestrutura da seção transversal das amostras da laminação em canais. Redução de 30% nos canais ovais conforme condição do ensaio da tabela IV.5. Ataque nital 2%. Aumento 12X.....	50
Figura 5.9	- Correlação entre a área calculada pelo modelo de regressão e a área média do poro para a laminação em canais.....	52

Figura 5.10 - Relação de resíduos e a área da porosidade calculada pelo modelo de regressão (laminação em canais).....	52
Figura 5.11 - Relação de resíduos e as variáveis do modelo de regressão (laminação em canais).....	53
Figura 5.12 - Diagramas de respostas da área do poro para as variáveis em seus dois níveis. 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%.....	55
Figura 5.13 - Seção transversal da amostra após cadeira 6. (a) Conforme condições do experimento 1 da tabela IV.5; (b) Conforme condições do experimento confirmatório; (c) Região central de (b) com aumento de 100x no MEV.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1 - Condições de deformação na laminação de barra conforme YSHINE.....	16
Tabela III.2 - Programas de resfriamento, temperaturas superficiais e alturas finais.....	23
Tabela IV.1 - Composição química dos aços baixo carbono e ligado (% em peso).....	34
Tabela IV.2 - Fatores e níveis dos ensaios do Planejamento de Experimentos no laminador de planos do DEMET/UFMG.....	37
Tabela IV.3 - Arranjo dos fatores e seus níveis para os 16 ensaios no laminador de planos do laboratório do DEMET/UFMG.....	37
Tabela IV.4 - Fatores e níveis dos ensaios do Planejamento de Experimentos no laminador de fio-máquina número 2 da ArcelorMittal Monlevade.....	39
Tabela IV.5 - Arranjo dos fatores e seus níveis para os 8 ensaios no laminador de fio-máquina número 2 da ArcelorMittal Monlevade.....	39
Tabela V.1 - Área do poro remanescente e carga de laminação para o PDE realizado no laminador de planos em laboratório.....	43
Tabela V.2 - Resumo dos resultados da regressão múltipla para o experimento no laminador de planos.....	44
Tabela V.3 - Área média do poro remanescente do PDE realizado no laminador 2 de fio-máquina da ArcelorMittal Monlevade.....	50
Tabela V.4 - Resumo dos resultados da regressão múltipla para o experimento na laminação industrial em canais (fio-máquina).....	51

LISTA DE NOTAÇÕES

- **D**: Diâmetro de trabalho do cilindro
- **DEMET**: Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
- **PDE**: Planejamento de Experimentos
- **h**: Altura do material após o passe
- **h_m**: Altura média do material
- **h₀**: Altura do material antes do passe
- **L**: Comprimento do arco de contato
- **MEV**: Microscópio Eletrônico de Varredura
- **MO**: Microscopia Óptica
- **R**: Raio nominal do cilindro
- **r_d**: redução parcial de área
- **V**: Velocidade de laminação

- **λ**: relação entre área de entrada e área de saída do passe.

RESUMO

Foram estudados os efeitos das variáveis temperatura de deformação, velocidade de laminação e redução de área no fechamento da porosidade central, artificialmente criada, em corpos de prova de seção transversal retangular para laminação em laminador de planos em laboratório, e em tarugos de aço para laminação em laminador industrial de fio-máquina.

Planejamentos de Experimentos (PDE) foram realizados para se conhecer a melhor condição para o fechamento da porosidade central. No laminador de planos do laboratório do DEMET/UFMG foi realizado um PDE com 4 variáveis (temperatura, velocidade de laminação, redução de área e tipo de aço) em dois níveis, e no laminador de fio-máquina da ArcelorMittal Monlevade foi realizado um PDE com 3 variáveis (temperatura, velocidade de laminação e redução de área) em dois níveis.

As amostras após laminação foram cortadas na seção transversal, polidas e atacadas para visualização da porosidade central remanescente através de microscopia óptica, e a área do poro foi medida. A avaliação da efetividade dos parâmetros de laminação no fechamento da porosidade central foi feita através de uma análise de regressão.

Os resultados obtidos na laminação de planos confirmaram a influência da interação entre temperatura, velocidade de laminação e redução de área no fechamento da porosidade central na laminação de planos, sendo a melhor condição em temperatura alta, velocidade baixa e redução alta. O fechamento da porosidade central foi mais efetivo em aço baixo carbono do que em aço ligado nas mesmas condições. Na laminação de fio-máquina os resultados mostraram a interação entre temperatura, velocidade de laminação e redução de área nos canais ovais, com a melhor condição em alta temperatura, velocidade baixa e redução nos canais ovais baixa (maior relação D/h_0 nos canais redondos), sendo mais efetiva para o fechamento da porosidade central.

ABSTRACT

It was studied in this work the influence of deformation temperature, rolling speed and reduction of area in the closure of an artificial central longitudinal porosity, in rectangular cross section specimen for flat rolling in laboratory, and billets for wire rod rolling.

Design of Experiment (DOE) was performed to know the best condition to the closure of the central porosity. For flat rolling at the DEMET/UFMG laboratory, a DOE was carried out testing 4 parameters (temperature, rolling speed, reduction of area and steel grade) in two levels, and for wire rod rolling it was carried out a DOE testing 3 parameters (temperature, rolling speed and reduction of area) in 2 levels.

After rolling, samples were cut out on cross section, polished and etched to identify the remaining central porosity by optical microscopy. The area of the central porosity was measured, and the effectiveness of the closure was checked by a regression analysis.

The results for flat rolling have shown the influence of temperature, speed rolling and reduction of area in the closure of the central porosity by flat rolling, and the best condition was in high temperature, low speed and high reduction, and it was more effective in low carbon steel than in alloy steel at the same conditions. For wire rod rolling the results have shown the interaction of the same parameters above, and the best condition was in high temperature, low speed and low reduction of area in the oval groove rolls (higher D/h_0 ratio in the round grooves).

1. INTRODUÇÃO

A ArcelorMittal Monlevade é uma das principais produtoras de fio-máquina de aço de alto valor agregado no Brasil, para a produção de cordoalhas para pneus, cabos de aço, molas de suspensão, amortecedores, parafusos, dentre outras aplicações. O nível de exigência de qualidade destes produtos está cada vez mais alto, exigindo um desenvolvimento contínuo do processo de produção e de detecção de eventuais defeitos.

As principais características de qualidade do fio-máquina para aplicações especiais que podem ser destacadas são: resistência mecânica, baixo nível inclusionário, isenção de descarbonetação total (ferrita livre), estrutura metalúrgica homogênea e baixos níveis de defeitos internos e superficiais. Dentre estes, a qualidade interna (em função de defeitos tipo trinca e porosidade ou vazio) vem sendo amplamente discutida devido a sua forte influência nas características de resistência mecânica dos componentes finais. Além disto, existe uma demanda crescente no aumento do diâmetro final do fio-máquina, com a conseqüente redução do número de passes e da quantidade de deformação disponível na laminação.

O aço na condição lingotado algumas vezes contém vazios, que surgem principalmente por causa da contração do material durante a solidificação ou aprisionamento de gases. Geralmente, a maior fração de vazios está localizada no centro do material, e muitas vezes, é tão alta que um poro central longitudinal é formado. A porosidade pode ser detectada através de ensaios por ultra-som nos tarugos, ou através de análise metalográfica do fio-máquina laminado, caso o defeito não seja fechado durante a laminação.

Existem poucas informações a respeito deste tema para a laminação de fio-máquina. Na laminação de placas e no forjamento a quente, onde a disponibilidade de literatura técnica é ampla, o fechamento da porosidade central está associado principalmente à temperatura e taxa de deformação.

Foram estudados os efeitos de variáveis como temperatura de deformação, velocidade de laminação e redução de área no fechamento da porosidade central, artificialmente criada, em corpos de prova de seção transversal retangular para laminação de planos

em laboratório, e em tarugos de aço para laminação industrial de fio-máquina. Planejamento de Experimento e análises dos resultados por regressão múltipla foram realizados objetivando-se identificar a combinação das variáveis e seus níveis para o mais efetivo fechamento da porosidade central em cada tipo de processo de laminação, além de determinar as melhores condições para o fechamento de uma eventual porosidade nas primeiras cadeiras do laminador 2 de fio-máquina da ArcelorMittal Monlevade.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi estudar a influência de fatores que propiciem uma maior tensão de compressão no centro do material laminado como temperatura de deformação, redução de área e velocidade de laminação no fechamento da porosidade central, artificialmente criada, nas condições de deformação em cilindros de mesa lisa e em cilindros com canais, da seguinte forma:

- Em corpos de prova de seção transversal retangular de aço baixo carbono e aço ligado no laminador de planos do laboratório do DEMET/UFMG;
- Em tarugos de aço baixo carbono nas primeiras cadeiras do laminador de fio-máquina da ArcelorMittal Monlevade.

Foi objetivo também identificar uma condição de processo otimizada na laminação de fio-máquina para o fechamento de uma eventual porosidade central proveniente de tarugo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Porosidade Central

3.1.1. Definição e mecanismos de formação

O aço, na condição lingotado, muitas vezes contém vazios, surgindo principalmente devido à contração do material durante a solidificação ou aprisionamento de gases. Visto que a redução em volume na transformação de fase de líquido para sólido durante a solidificação é maior do que a contração da casca do veio que ocorre ao mesmo tempo, espaços vazios (“blowholes”) são formados no centro do veio ⁽¹⁾. Geralmente a maior fração de vazio está localizada no centro do material, muitas vezes com formato transversal circular, e pode ser tão alta que um poro central longitudinal é formado. Estes defeitos, quando presentes no produto lingotado, se constituem uma das principais razões para a recusa por ensaio de ultra-som ⁽²⁾. A figura 3.1 mostra uma foto da seção transversal de um tarugo de lingotamento contínuo com porosidade central.

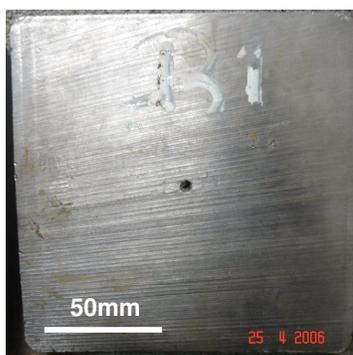


Figura 3.1: Seção transversal de um tarugo apresentando porosidade central. Dimensão do tarugo: 155 x 155 mm.

A porosidade geralmente ocorre como um dos seguintes resultados ⁽³⁾:

- Contração do aço durante a solidificação;
- Gases dissolvidos no aço líquido, que diminuem a sua solubilidade com a diminuição da temperatura;
- Gases fisicamente capturados, e;
- Alimentação inadequada de líquido em regiões localizadas do lingotamento.

A teoria do mini-lingote é uma formulação teórica para a tentativa de explicar os padrões de contração observados no lingotamento contínuo. A teoria ⁽⁴⁾ consiste na divisão do tarugo em cinco partes que analisam individualmente a solidificação e o histórico térmico, conforme apresentado na figura 3.2. Em (a) existe um crescimento uniforme da zona colunar e o seguimento segue perpendicular à direção de extração de calor. Em (b) algumas dendritas colunares tendem a crescer mais rapidamente que as suas vizinhas devido à instabilidade causada pelas correntes convectivas e gradientes térmicos associados ao preenchimento do molde pela válvula submersa. Em (c) o crescimento colunar acentuado pode produzir pontos de solidificação que isolam pequenas bolsas de aço líquido. Neste caso, a solidificação destas bolsas de metal líquido ocorre de maneira semelhante à solidificação de lingotes, e deste modo são conhecidos como mini-lingotes. Em (d) a solidificação se encerra enquanto uma cavidade interna de contração pode ser formada. Finalmente, em (e), com a solidificação completada, tem-se a macroestrutura final.

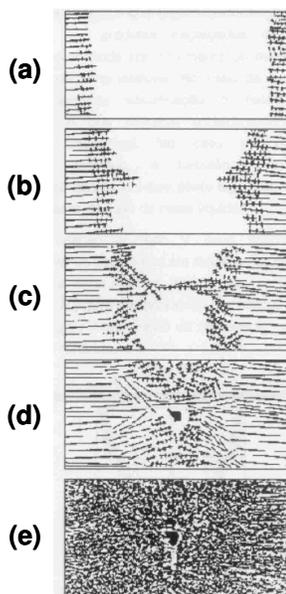


Figura 3.2: Modelo de solidificação do IRSID. Passos da teoria do mini-lingote ⁽⁴⁾.

Contração e gases dissolvidos em pequenas quantidades têm uma tendência de formar poros angulares, enquanto maiores teores de gases produzem poros esféricos. No presente trabalho, apenas os poros esféricos serão considerados. Evidências experimentais mostram que o tamanho da porosidade formada é fortemente dependente da taxa de solidificação e da quantidade de gás dissolvido no metal ⁽⁵⁾.

3.1.2. Mecanismos de prevenção e detecção

A taxa de solidificação influencia na formação da porosidade. Também abaixo de certo teor de gás, que depende da taxa de solidificação, nenhuma porosidade ocorre ⁽⁵⁾. A agitação eletromagnética no molde também tem uma grande influência na formação da porosidade central, sendo percebida maior ocorrência de porosidade com a falha da agitação e variações na velocidade de lingotamento. A utilização de agitador duplo no molde (“Dual Coil”) e agitador eletromagnético final, conhecido como F-EMS (“Final Electro Magnetic Stirring”), também auxiliam na redução da porosidade central em tarugos.

Uma nova tecnologia foi desenvolvida para reduzir, e até mesmo eliminar, defeitos centrais de blocos e tarugos como segregação e porosidade, chamada de “soft reduction”. Rolos posicionados na posição de extração e endireitamento dos tarugos na máquina de lingotamento contínuo exercem uma pressão na superfície do material (Fig. 3.3). Uma redução de espessura adicional imediatamente após a completa solidificação do veio pode adicionalmente reduzir o volume de vazios remanescentes. Um modelo matemático de solidificação calcula a extensão do centro líquido em tempo real baseado nos parâmetros de lingotamento. O sistema de “soft reduction” conseqüentemente comprime o bloco/tarugo na área próxima ao final do centro líquido. Isto evita a formação de mini-lingotes devido à quebra de pontes de solidificação, sem a segregação em V e reduz a segregação e porosidade central ^(1,6).

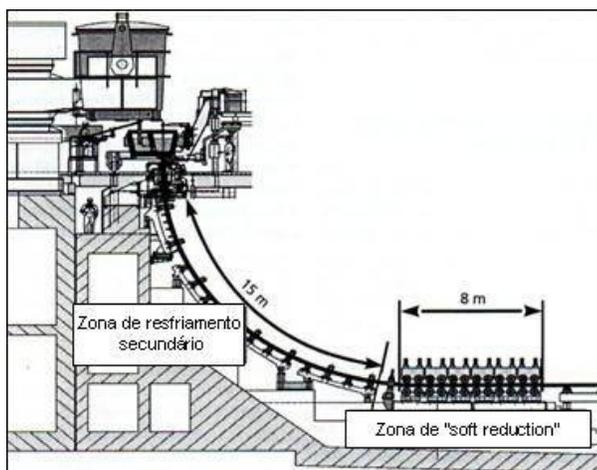


Figura 3.3: Representação de uma máquina de lingotamento contínuo com “soft reduction” ⁽¹⁾.

A detecção da porosidade central pode ser feita através de ensaio por ultra-som em tarugos. O ensaio por ultra-som caracteriza-se num método não destrutivo que tem por objetivo a detecção de defeitos ou descontinuidades internas. O objetivo do exame ultra-sônico é diminuir o grau de incerteza na utilização de materiais ou peças de alta responsabilidade. A figura 3.4 mostra o cabeçote do ultra-som posicionado na face de um tarugo apresentando porosidade central e a figura 3.5 mostra a indicação do defeito na tela do ultra-som.



Figura 3.4: Amostra de tarugo de seção quadrada de 155 x 155 mm apresentando porosidade central, com o cabeçote do ultra-som posicionado na face superior.

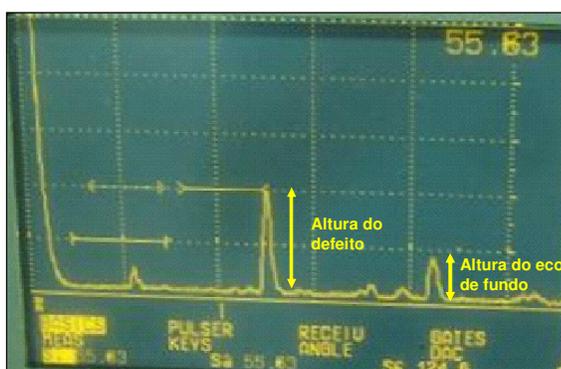


Figura 3.5: Tela do ultra-som mostrando o pico de indicação da porosidade central em tarugo.

3.1.3. Influência da porosidade no produto final

Caso a porosidade seja formada no processo de solidificação e não seja eliminada no processo de conformação, ela terá um efeito prejudicial no desempenho do material em serviço. O problema torna-se mais crítico quando o aço contém altos teores de hidrogênio (>1ppm), que favorece a iniciação de trincas nos defeitos já presentes ⁽²⁾.

Amostras de aço com e sem vazio interno após deformação para ligação das superfícies internas desse, foram ensaiadas em tração após tratamento térmico de recozimento e os resultados são mostrados na figura 3.6. Verificou-se que a resistência da amostra com vazio não foi além do seu limite de escoamento. Além disso, uma amostra com vazio foi rompida instantaneamente na seção transversal perpendicular ao eixo de tração. Isto é devido a área de superfície de ligação do vazio possuir um filme anti-ligante, incluindo um filme de óxido e materiais estranhos, que iniciam as trincas ⁽⁷⁾. Trabalhos de TREMAINE ⁽⁸⁾ e SIGL *et al.* ⁽⁹⁾ citam que a porosidade também influencia negativamente a vida a fadiga do material.

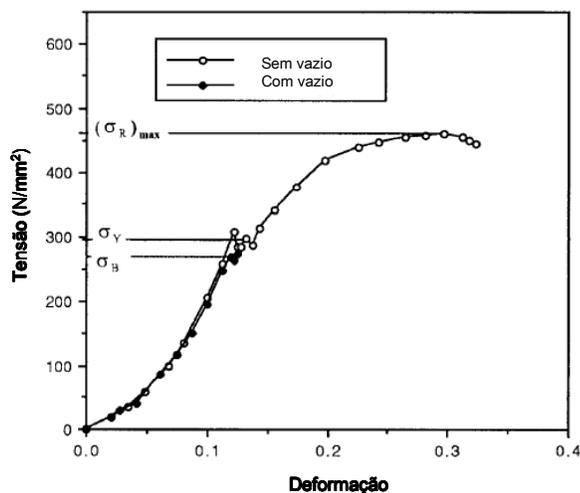


Figura 3.6: Comparação da tensão de tração entre uma amostra sem vazio e uma amostra com um vazio ⁽⁷⁾.

3.2. Fechamento da porosidade na laminação

É importante otimizar não apenas o processo de lingotamento, mas o processo de conformação a quente subsequente para eliminar a porosidade central. Vazios ou

poros devem ser eliminados por deformação compressiva durante o processo de conformação. Devido às condições de temperatura e deformação, os processos de laminação e de forjamento a quente possibilitam a redução e eliminação da porosidade central. Por se tratarem de processos similares de compressão direta, ambos os processos serão analisados.

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 ^(3,10,11). Se apenas o primeiro passo ocorre, poros não soldados podem comportar-se como trincas agudas, podendo tornar-se prejudiciais à performance do material ⁽³⁾. O processo de fechamento consiste no contato das duas superfícies internas através da deformação dos poros internos, enquanto o processo de ligação consiste na coesão das duas superfícies em contato ⁽⁹⁾. Parâmetros tais como temperatura do material durante a deformação, o gradiente de temperatura, a tensão compressiva máxima e a taxa de deformação ao redor do vazio, têm um efeito no processo de fechamento desse ⁽¹¹⁾.

Duas superfícies de um vazio fechado têm que ser completamente ligadas para eliminar alguma descontinuidade e, além disso, obter um produto isento de defeito. Muitas variáveis tais como temperatura de trabalho, a resistência do filme de óxido na superfície, a existência de contaminantes, a extensão da superfície e a pressão de contato, têm um efeito no nível de ligação. Neste processo de ligação é necessário aplicar alta pressão e alta temperatura. A força motriz para produzir a força coesiva é a temperatura de trabalho e a pressão normal interfacial. Mesmo que a força motriz também inclua difusão, isto tem pouca influência na força coesiva devido ao curto tempo de deformação ⁽¹¹⁾.

Resultados de experimentos laboratoriais realizados por WANG *et al.* ⁽³⁾, em amostras com furos usinados no centro e a ¼ da superfície, mostraram que a superfície interna de alguns poros foi parcialmente soldada, e a superfície interna não soldada se encontrava sempre na parte central. Isto mostra que o poro começa a fechar e soldar progressivamente das extremidades em direção ao centro. Eles também mostraram que os poros localizados mais próximos da superfície em relação ao centro fechavam mais rapidamente. No presente estudo foi considerado apenas os poros centrais.

STAHLBERG ⁽¹²⁾ propôs dois mecanismos para o fechamento de vazio de seção transversal quadrada, em laminação com cilindros planos paralelos, denominados Modo A e Modo B (Fig. 3.7). No modo A, durante a deformação o material move para dentro do vazio com uma velocidade v , ao mesmo tempo em que o lado vertical do vazio move na direção horizontal, causando extensão do buraco na direção do “alargamento”. De acordo com o Modo B, o material também move para dentro do vazio com uma velocidade v . Entretanto, o lado vertical do vazio não se move na direção horizontal e conseqüentemente este modo não resulta em extensão do vazio na direção do “alargamento”.

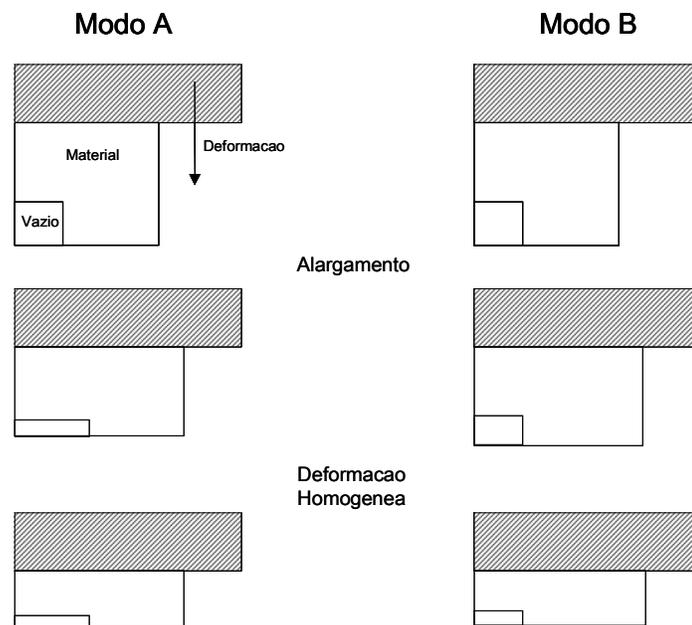


Figura 3.7: Representação esquemática do modelo teórico para redução de vazio de acordo com o Modo A e Modo B ⁽¹²⁾.

De acordo com a teoria acima, a fração de vazio diminuirá devido ao Modo B favorável se reduções pesadas são usadas com cilindros grandes. Para reduções leves a diminuição iniciará de acordo com o Modo A, para o qual o vazio se estenderá na direção do “alargamento”: Após alguns passes, entretanto, o Modo A será interrompido pelo Modo B. Se a fração de vazio diminuiu de acordo com o Modo A e se o vazio não está completamente fechado quando a deformação terminou, o vazio terá uma grande extensão na direção da largura do material. Se o material é laminado de acordo com o Modo A e depois é girado a 90° para subsequente laminação, é assumido ser pior do

que se o fechamento inicial do vazio tivesse sido de acordo com o Modo B. Após o giro do material, os valores de R/h_m diminuem e conseqüentemente uma pressão menos favorável é introduzida nas proximidades do vazio. Além disso, a própria geometria do vazio – obtida por extensão do vazio na direção do alargamento de acordo com o Modo A durante os primeiros passes – favorece o Modo A após o giro: isto implica a possibilidade de grande aumento da fração de vazio durante o próximo passe, especialmente quando cilindros pequenos são usados.

3.3. Influência dos parâmetros de processo

Vários estudos foram realizados em laminação e forjamento de lingotes e placas para se estudar os efeitos das variáveis de ambos os processos no fechamento de poros. Estes estudos incluíram deformação em escala piloto em laboratório ^(3,11,13,14), deformação em escala industrial ^(15,16,18) e simulação por elementos finitos ^(3,7,10,12,19-23). O método de análise por elementos finitos tem sido amplamente aplicado para simular a deformação plástica em materiais nos processos de laminação e forjamento a quente. Na revisão dos parâmetros a seguir, os resultados dos três métodos serão discutidos.

3.3.1. Redução de área

Um programa de laminação requerendo um fechamento forçado de um poro central deve ser baseado em reduções pesadas ⁽²⁴⁻²⁷⁾, assegurada por meio de cilindros grandes ⁽¹⁵⁾. A seção transversal de um tarugo é menor que a de uma placa ou bloco e conseqüentemente a redução disponível para o fechamento do poro é menor.

Resultados de WANG *et al.* ⁽³⁾ em simulação por elementos finitos mostraram que em reduções maiores que 30% os poros fechavam mais rapidamente na abertura entre cilindros. Eles também discutiram através de análise por elementos finitos que altas reduções aumentam a pressão hidrostática ao redor do poro, auxiliando no fechamento mais rápido. Baixas reduções podem resultar na expansão do vazio devido às tensões de tração que são induzidas ⁽¹⁷⁾.

STAHLBERG *et al.* ⁽¹³⁾ realizaram experimentos com vazios quadrados e redondos aleatoriamente distribuídos e seus resultados indicaram que o fechamento dos vazios

é proporcional à redução e insensível à forma do vazio. Também foi evidenciado que quanto menor o tamanho do vazio menor a redução necessária, e mais rápido é o seu fechamento (Fig. 3.8).

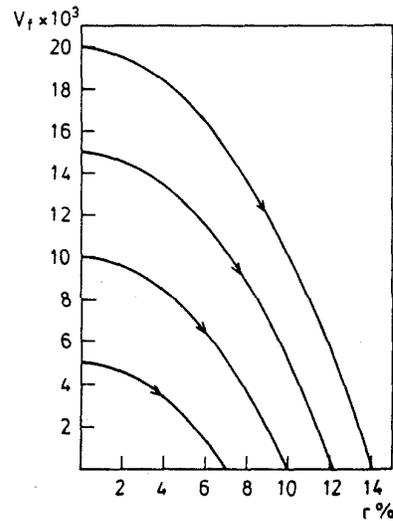


Figura 3.8: Influência da redução na diminuição da fração do vazio para amostras com várias frações iniciais de vazios ⁽¹³⁾.

r: redução

V_f: fração volumétrica de vazios

Cálculos realizados por KEIFE *et al.* ⁽¹⁷⁾ mostraram que a pressão no início do programa de deformação é de grande importância. Se a pressão é alta o suficiente para resultar em um mecanismo favorável de fechamento de vazio de acordo com o Modo B (discutido no item 3.2), a pressão necessária para manter este mecanismo diminui durante os passes seguintes. Esta conclusão implica que o programa não inclui giro do material em 90°.

O número de passes e a redução por passe também são parâmetros importantes na determinação do rápido fechamento do poro. Simulações feitas por PIETRZYK *et al.* ⁽²¹⁾ mostraram que o fechamento do poro foi mais rápido na laminação em 5 passes com reduções pesadas e resfriamento intenso da superfície da placa (programa III) do que em uma laminação em 10 passes com reduções moderadas (programa I). O programa II consiste de 5 passes com reduções pesadas idênticas ao programa III mas sem resfriamento da superfície da placa. A figura 3.9 mostra a forma tomada pelo vazio de acordo com o estado de tensão criado na laminação nos três programas simulados.

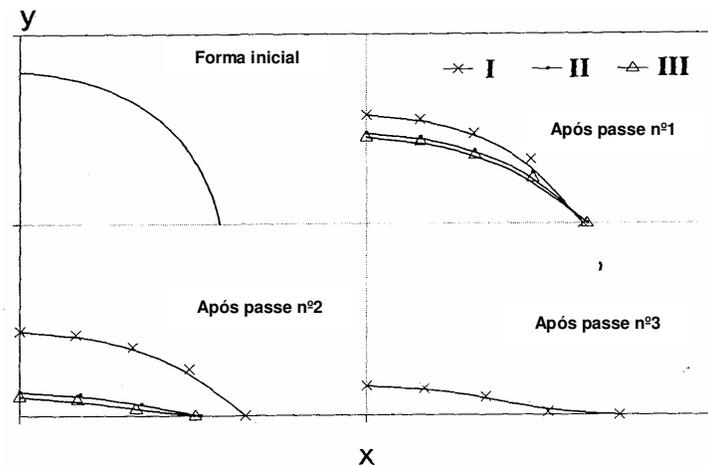


Figura 3.9: Fechamento de um vazio para estados de tensões determinados para os três programas de laminação considerados ⁽²¹⁾.

WALLERO ⁽¹⁴⁾ realizou experimentos com cilindros planos e amostras de aço com seção transversal quadrada, mostrando que menor número de passes com reduções por passe maiores é mais efetivo no fechamento de poros do que maior número de passes com menores reduções por passe, conforme mostrado na figura 3.10.

A figura 3.11 mostra que a mudança de forma do poro é dependente de r_p : Os exemplos são tomados do programa apresentado na figura 3.10. Em ambos os casos a amostra foi laminada para a mesma redução em altura, mas com diferentes valores de r_p , resultando em grandes diferenças no tamanho do poro.

A figura 3.12 mostra o comportamento de um vazio central em uma placa laminada com reduções de 8, 18 e 27%, respectivamente. Neste experimento pode ser visto que com uma redução de 27% a altura do vazio diminuiu para zero, indicando que o vazio foi completamente fechado ⁽²⁰⁾.

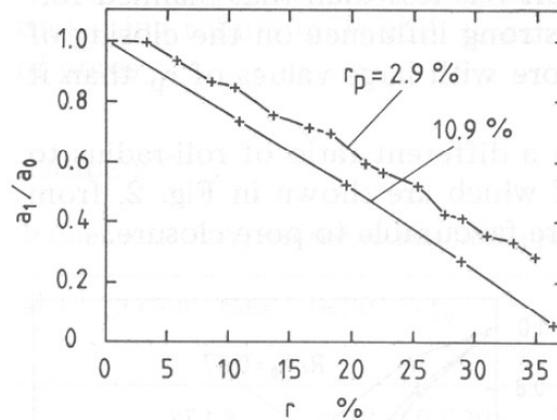


Figura 3.10: Influência da redução por passe r_p no tamanho do poro em tarugos de aço quando $R/h_0 = 2,82$ e $a_0/h_0 = 0,11$ ⁽¹⁴⁾.

a_0 : área transversal inicial do poro

a_1 : área transversal atual do poro

r : redução acumulada em altura da amostra

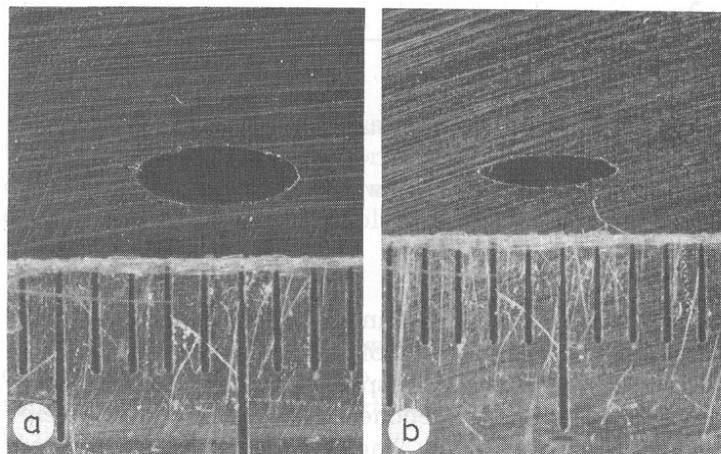


Figura 3.11: Poros em amostras de aço, onde em ambos os casos a amostra foi laminada para a mesma redução em altura com diferentes valores de r_p : (a) 12 passes com $r_p = 2,9\%$; (b) 3 passes com $r_p = 10,9\%$ ⁽¹⁴⁾.

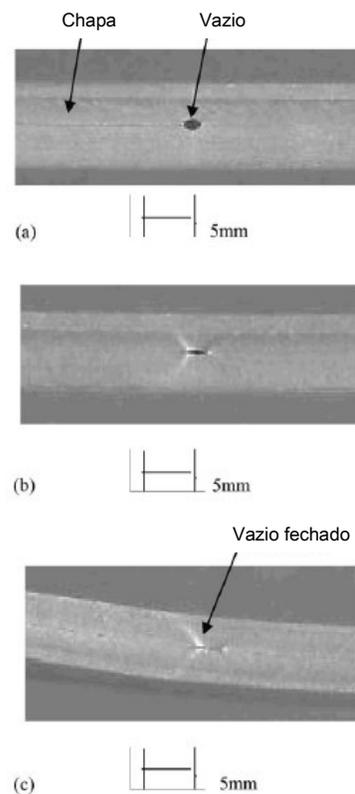


Figura 3.12: Aparência do produto laminado e do vazio: (a) redução de 8%, (b) redução de 18%, (c) redução de 27%. $R = 100 \text{ mm}$, $V = 5 \text{ mm/s}$, $h_0 = 10 \text{ mm}$ ⁽²⁰⁾.

TAGAWA *et al.* ⁽¹⁶⁾ deduziram dos resultados dos experimentos de laminação de lingotes grandes que o fator mais importante para a aniquilação de micro-porosidades no centro da espessura era a tensão compressiva perpendicular ao plano de laminação no centro da espessura. Foi demonstrado que as micro-porosidades eram facilmente aniquiladas no estágio inicial de laminação sob tais condições que capacitavam a tensão compressiva exceder a resistência à deformação significativamente. Estas condições eram realizadas pelo processo de laminação com grande quantidade de redução por passe utilizando o cilindro de trabalho com grande diâmetro, enquanto no caso de laminação com redução leve as micro-porosidades eram retidas como imperfeições alongadas até o último estágio de laminação.

Também de acordo com a literatura, quando existe uma porosidade central no tarugo, ela pode ser fechada e perfeitamente soldada quando o coeficiente de fricção é grande ⁽³⁾. Uma forma de aumentar o coeficiente de fricção no centro é aumentar a redução como mostrado na tabela III.1 e figura 3.13. De acordo com YSHINE ⁽²⁸⁾ a

deformação equivalente no centro do material laminado é maior com o aumento da redução.

Tabela III.1: Condições de deformação na laminação de barra conforme YSHINE ⁽²⁸⁾.

	Redução na primeira cadeira	Redução na segunda cadeira
Caso 1	12,5%	13,0%
Caso 2	12,5%	6,0%
Caso 3	5,0%	12,4%
Caso 4	5,0%	5,0%

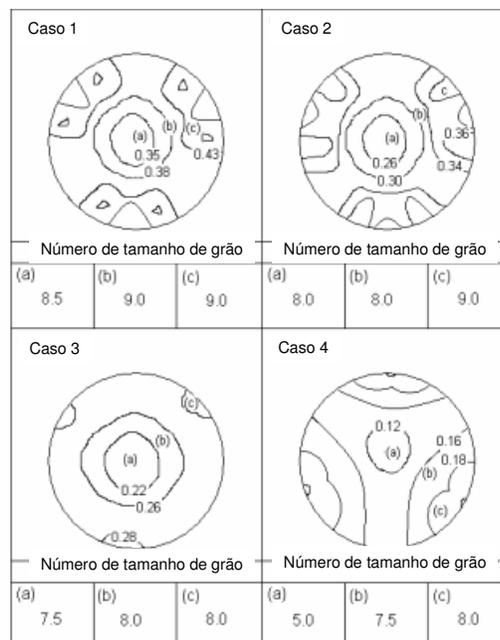


Figura 3.13: Distribuição da deformação equivalente em barra cilíndrica laminada em quatro condições de deformação diferentes, conforme mostrado na tabela III.1 ⁽²⁸⁾.

Deve-se ressaltar que a indicação da redução necessária para fechamento de poros sem especificar as condições de laminação ocorre freqüentemente na literatura, e a ação conjunta de outros parâmetros de processo pode auxiliar, ou até mesmo prejudicar, o fechamento dos poros.

3.3.2. Temperatura

Resultados de WANG *et al.* ⁽³⁾ na laminação experimental em temperaturas de 900, 1050 e 1200°C, mostraram que a superfície do poro soldou-se muito bem em maior temperatura (1050°C), e a resistência da solda foi maior. Uma das razões é que a taxa de difusão aumenta rapidamente com a temperatura e a tensão de escoamento da matriz metálica é mais baixa, permitindo que a superfície do poro faça um contato mais efetivo, resultando também em um maior fluxo difusional entre as superfícies em contato. Em temperaturas menores, em torno de 900°C, um óxido de ferro escuro pôde ser visto ao longo do traço do poro, tornando a solda muito fraca. Isto sugere que maior temperatura e maior deformação são úteis em reduzir o efeito de óxidos na soldagem da superfície de poros. Quando a redução foi suficientemente alta (tipicamente 50%), o poro fechou e soldou muito bem durante a laminação entre temperaturas de 900°C e 1200°C, indicando o efeito conjunto destas variáveis.

Experimentos realizados por PARK ⁽⁷⁾ em forjamento de amostras de aço com poro interno mostraram que a eficiência de ligação das superfícies do poro para temperaturas de 1000°C foi menor do que para as temperaturas de 1200 e 1100°C. Para a temperatura de 1000°C, maior redução em altura será necessária para obter a mesma eficiência de ligação como nos casos de 1200 e 1100°C.

3.3.3. Velocidade

Análises por elementos finitos mostraram que ambas a pressão hidrostática ao redor do poro e o período em que a pressão foi mantida pareceram determinar o grau de soldagem do poro ⁽³⁾.

TAGAWA *et al.* ⁽¹⁶⁾ mostraram através da laminação de lingotes que a velocidade de laminação lenta e alta temperatura auxiliaram a aniquilação de micro-imperfeições finas alongadas, mesmo com reduções leves. Este fenômeno pode ser interpretado em termos do efeito do tempo e temperatura na aniquilação de interfaces por meio de processos de difusão e escoamento viscoso. A figura 3.14 mostra o resultado do cálculo do índice de defeito relativo (quanto maior este índice, maior a microporosidade após a laminação) em função da razão de laminação (espessura inicial / espessura final) para as condições de laminação testadas. Verifica-se que para este

experimento, em razões de redução acima de 2.7, redução leve com baixa velocidade e redução pesada apresentam baixo índice de defeito.

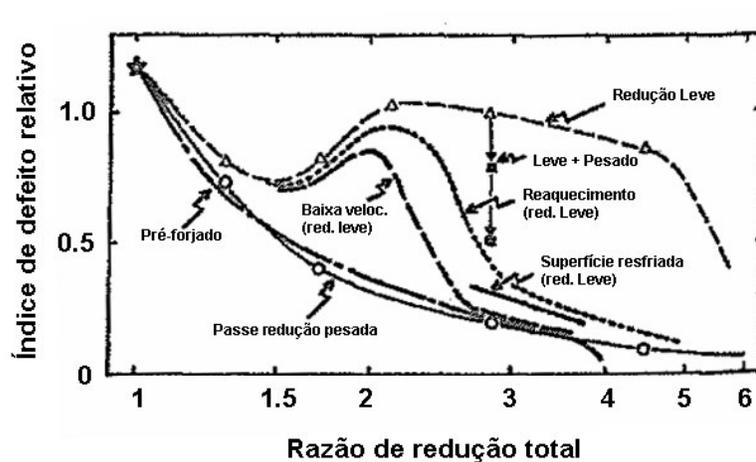


Figura 3.14: Relação entre a razão de redução total e o índice de defeito relativo em várias práticas de laminação (aço ligado) ⁽¹⁶⁾.

A taxa de deformação na laminação é uma função da velocidade periférica dos cilindros, equação 3.1:

$$\dot{\epsilon} = \frac{V_R \times \epsilon}{L} \quad (3.1)$$

onde V_R é a velocidade periférica dos cilindros, ϵ é deformação ($\ln(h_0/h)$) e L é o arco de contato projetado. Com a redução da velocidade de laminação, a taxa de deformação diminui para uma mesma redução e a resistência à deformação do material diminui ⁽²⁹⁾ (Fig. 3.15), auxiliando o fechamento de poros.

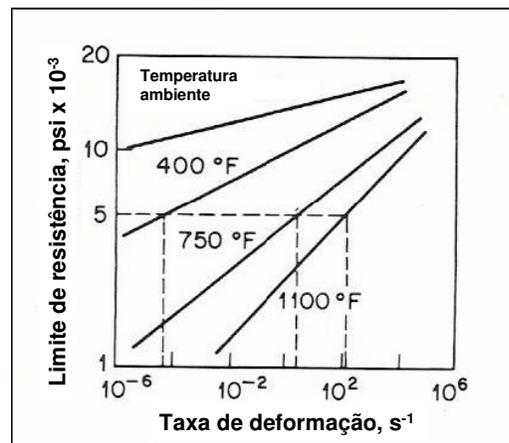


Figura 3.15: Variação do limite de resistência com a taxa de deformação em aço ⁽²⁹⁾.

3.3.4. Diâmetro do cilindro/matriz e altura do material

Têm sido geralmente relatado que grandes valores de L/h_m , onde L é o comprimento do arco de contato e h_m a altura média do material, são preferíveis para o fechamento do vazio ⁽²⁷⁾. A explicação é que estas geometrias resultam em valores favoráveis da pressão hidrostática dentro da região plástica ^(12,17) e tensões compressivas no centro do material ^(14,21,23,24). Desta forma, um programa de laminação deve ser baseado em reduções pesadas por meio de cilindros grandes.

Durante a laminação a quente, é possível que a região central da placa esteja sujeita a tensão de tração, enquanto o restante do material está sob compressão. A formação da zona de tração é favorecida quando a carga de laminação é menor que a resistência à deformação na região central. Evidentemente, a criação de um gradiente de temperatura adequado entre a superfície e o centro da placa pode diminuir a zona tracionada. Os defeitos que porventura existam nesta zona tenderão a se alongar no sentido de laminação e, desta forma, deteriorar a qualidade interna do produto laminado. Para se evitar isto, deve-se tentar diminuir a zona de tração, ou seja, aumentar a zona de compressão do material. Estudos realizados têm mostrado que o tamanho da zona de compressão pode ser representado por um fator de forma S (eq. 3.2), dado por ⁽²⁾:

$$S = \frac{\sqrt{R \times (H - h)}}{(H + h) / 2} \quad (3.2)$$

onde R é o raio do cilindro (mm), H é a espessura de entrada (mm) e h é a espessura de saída (mm). Quando $S \geq 1$ a zona de compressão estende-se à espessura inteira da placa. Observa-se que além da razão mínima de laminação (razão da espessura placa/chapa), é importante também a aplicação de deformações pesadas, isto é, altos valores de S no passe.

A figura 3.16 mostra as simulações por elementos finitos realizadas por CHAIJARUWANICH et al. ⁽²³⁾ em deformação plana. Para baixa relação L/H (onde L é o comprimento de contato e H é a altura inicial) a deformação foi concentrada nas camadas superficiais e não penetrou até o meio da placa. Com uma alta relação L/H uma tensão hidrostática compressiva (negativa) é experimentada em toda a espessura da placa, embora ela seja maior na superfície do que no centro. É proposto que é esta tensão hidrostática de tração que permite o aumento do poro central. Portanto, não é apenas a redução por passe que determina o fechamento do poro mas uma função mais complexa da geometria de laminação.

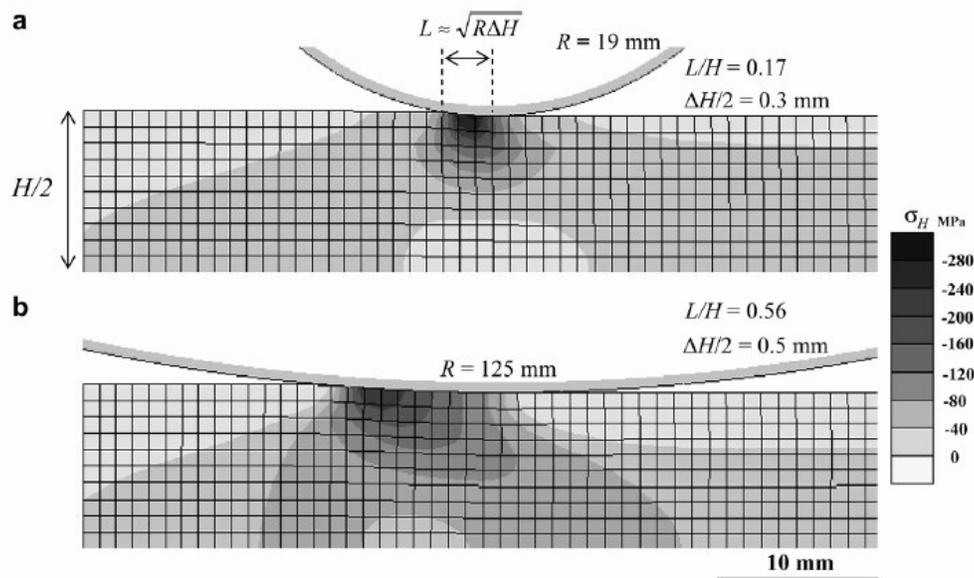


Figura 3.16: Distribuição da tensão hidrostática (σ_H) durante a laminação em deformação plana de uma placa de 20 mm de espessura com raio do cilindro de (a) 19 mm e (b) 125 mm ⁽²³⁾.

A figura 3.17 de NAKAO *et al.* ⁽²⁴⁾ mostra a distribuição de tensões na abertura dos cilindros durante a laminação de placas de grande seção, indicando a presença de tensão de tração no centro do material.

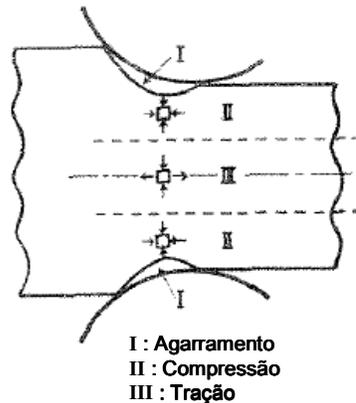


Figura 3.17: Desenho esquemático da distribuição de tensões na abertura entre os cilindros durante a laminação de placa de grande seção ⁽²⁴⁾.

Considerando o forjamento ou laminação de uma tira espessa, é bastante possível encontrar vários estados de tensões no centro do material, que como conseqüência podem promover mais ou menos o fechamento dos poros. Tensões de tração serão criadas se pequenos comprimentos de contato são usados no processo de deformação, podendo resultar no aumento do poro no início da deformação. É muito importante garantir que o fechamento do vazio se completou nas operações iniciais de deformação, ao contrário os vazios expandirão perpendicularmente à direção de compressão, resultando em uma considerável deterioração das propriedades mecânicas do produto final ⁽¹⁷⁾.

A figura 3.18 mostra os resultados laboratoriais de WALLERO ⁽¹⁴⁾ em amostras de seção quadrada laminadas em cilindros planos, quando a maior relação R/h_0 favoreceu o mais rápido fechamento do poro. Também é citado pelo autor que é favorável girar a amostra entre cada passe para grandes valores de L/h_m , enquanto que para pequenos valores de L/h_m é mais eficiente laminar sem girar a amostra até os poros serem eliminados.

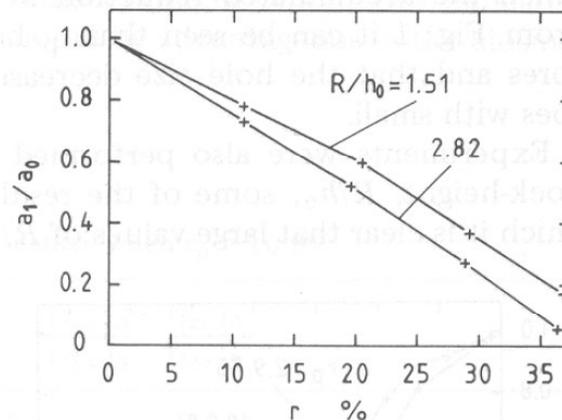


Figura 3.18: Influência de R/h_0 no tamanho do poro em tarugos de aço quando $r_p = 10,9\%$ e $a_0/h_0 = 0,11$ ⁽¹⁴⁾.

a_0 : diâmetro inicial do poro

a_1 : eixo menor atual do poro

r : redução acumulada em altura da amostra

No laminador de barras da Sanyo (Japão) houve um aumento no diâmetro dos cilindros de 630 para 900 mm e na potência dos motores para se obter uma maior redução por passe, isto através da análise da tensão hidrostática no centro do material por elementos finitos ⁽¹⁹⁾.

Simulações realizadas por PARK ⁽¹⁰⁾, através de elementos finitos no forjamento a quente, mostraram que a eficiência do fechamento do poro era mais dependente da relação entre a largura da matriz e a altura do lingote que do tempo de pré-resfriamento e da quantidade de redução.

3.3.5. Gradiente de temperatura

O gradiente de temperatura no material laminado corresponde à diferença de temperatura entre a superfície e o centro. O efeito benéfico do pré-resfriamento do material é aumentar a deformação e a tensão compressiva no centro. Quando o material é pré-resfriado para adquirir um gradiente de temperatura na direção radial, a camada externa da superfície até certa profundidade, antes de atingir o centro do material, é super-resfriada, mas o centro retém a temperatura inicial. Então, ocorre um aumento da tensão de escoamento resultante do pré-resfriamento na camada mais

externa, e uma maior tensão hidrostática na região central será obtida, mas também uma maior pressão é necessária ⁽¹¹⁾.

STAHLBERG *et al.* ⁽¹⁵⁾ estudaram a influência do resfriamento forçado no fechamento de porosidade central em lingotes de aço de seção quadrada de 300 x 300 mm, laminados em cilindros planos. A tabela III.2 mostra os programas de resfriamento realizados nos testes. A altura inicial do poro era de 30 mm. Verificou-se que é possível obter uma redução maior dos poros por meio de um resfriamento da superfície do material em contato com os cilindros.

Tabela III.2: Programas de resfriamento, temperaturas superficiais e alturas finais ⁽¹⁵⁾.

Nº Lingote	0	2	4	5
Programas de Resfriamento	Ar 4 min	Água 2 min	Água 1 min Ar 1 min Água 1 min	Água 1 min Ar 2 min Água 1 min
Temperatura Inicial (°C)	1095	1110	1038	1052
Após Resfriamento (°C)	980	914	888	846
Após Laminação (°C)	980	906	816	840
Altura Final do Poro (mm)	16,9	11,9	10,7	13,5

Considerando as faces verticais dos lingotes, é evidente que a forma côncava da superfície livre é menos marcante quando grandes reduções em altura do poro são obtidas. Portanto, o alargamento da parte central do lingote foi grande, e concluiu-se que alargamentos pesados correspondem a uma grande diminuição da altura do poro (Fig. 3.19). A natureza do resfriamento teve uma grande influência na altura final do poro. A interrupção do resfriamento por 1 min promoveu o maior fechamento do poro, presumindo que a “onda de resfriamento” penetrou no lingote, mas não até o centro. Um material mais duro foi obtido na seção transversal, com exceção de uma região macia ao redor do poro, desta forma a deformação tornou-se mais concentrada no centro do lingote. Com resfriamento não interrompido, a “onda de resfriamento” não penetrou o suficiente no lingote, e a interrupção por 2 min provavelmente fez com que a “onda de resfriamento” penetrasse em todo o lingote, fazendo com que o centro também endurecesse, concentrando menos deformação nesta região.

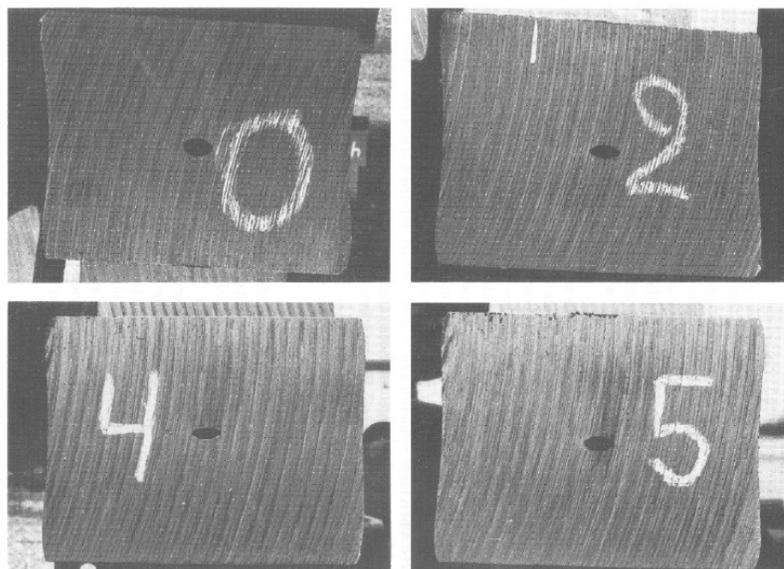


Figura 3.19: Influência do resfriamento, tabela III.2, na diminuição do poro após uma redução em altura de aproximadamente 18% em laminação plana ⁽¹⁵⁾.

Resultados de PIETRZYK *et al.* ⁽²¹⁾, usando a simulação por elementos finitos na laminação de placas, mostraram que as tensões compressivas foram maiores quando o material foi submetido a um resfriamento intenso da superfície antes da laminação. Isto levou a conclusão que o resfriamento da superfície da placa resultou em um aumento da compressão hidrostática na zona central da placa e favoreceu o fechamento dos vazios.

Os trabalhos de IMAMURA *et al.* ⁽²⁶⁾ e de TSUDA *et al.* ⁽²⁷⁾ mostraram que uma maior temperatura interna de laminação da placa em relação à temperatura externa, tão bem como uma redução pesada, é efetiva para eliminar defeitos internos tipo microporosidade.

3.3.6. Formato do cilindro e da matriz de deformação

FILIPOVIC ⁽¹⁸⁾ realizou um experimento em barras de aço de 12,5 mm de diâmetro, com furo interno artificialmente usinado de 4 mm de diâmetro. As barras foram aquecidas a 930°C e laminadas em um bloco acabador com 8 passes. A primeira barra foi laminada apenas na cadeira 1, a segunda barra foi laminada nas cadeiras 1 e 2, e assim sucessivamente até a última barra ser laminada nas 8 cadeiras do bloco. As

barras foram cortadas na seção transversal e os poros remanescentes analisados visualmente. A Figura 3.20 mostra a seção transversal das barras após cada passe em uma seqüência oval-redondo.

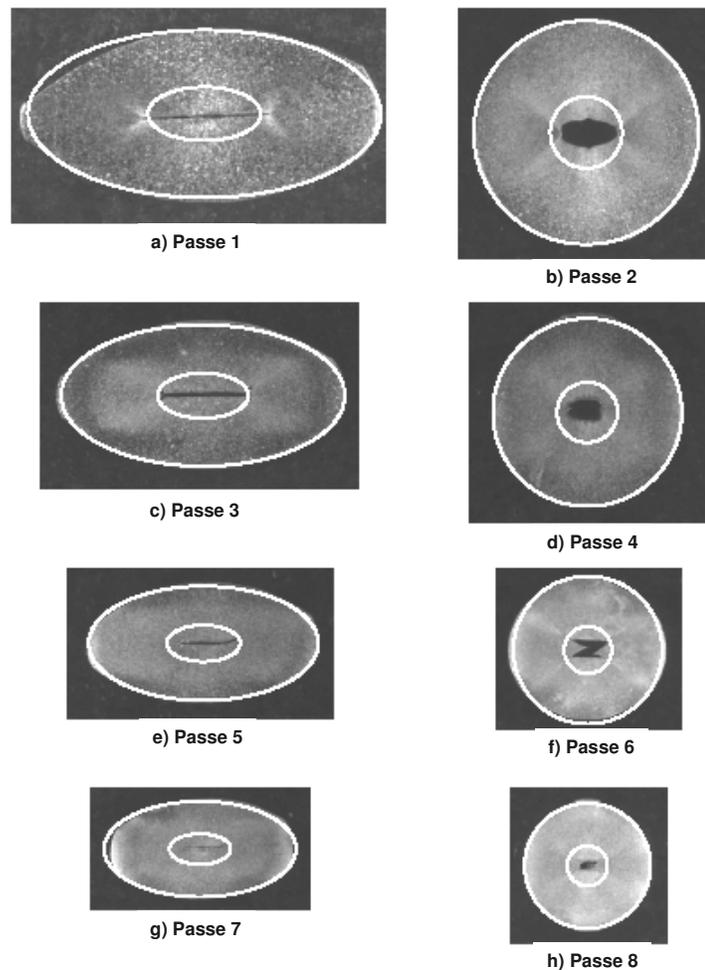


Figura 3.20: Seções transversais de barras ocas após cada passe (a-h) em uma seqüência oval-redondo. As linhas inseridas ilustram a contração uniforme da cavidade central pela proporção geométrica ⁽¹⁸⁾.

O primeiro passe oval reduz muito a altura da cavidade e aumenta significativamente sua largura, e os passes redondos reduzem menos a altura mas provocam menor alargamento do vazio. Como visto pelas linhas inseridas nas figuras, os poros se fecham mais que a redução do material na mesma escala, além de mostrar uma assimetria em sua forma em relação ao previsto pela linha inserida na figura.

Experimentos realizados por PARK ^(7,10) e TANAKA *et al.* ⁽³¹⁾, no forjamento à quente em amostras de aço, mostraram que em matrizes com formato em V, a velocidade de ligação das superfícies do vazio assim como a eficiência de ligação são melhores do que em matrizes planas. A figura 3.21 mostra a configuração das malhas da simulação em elementos finitos para os dois tipos de formato das matrizes e a distribuição da deformação efetiva no centro do material.

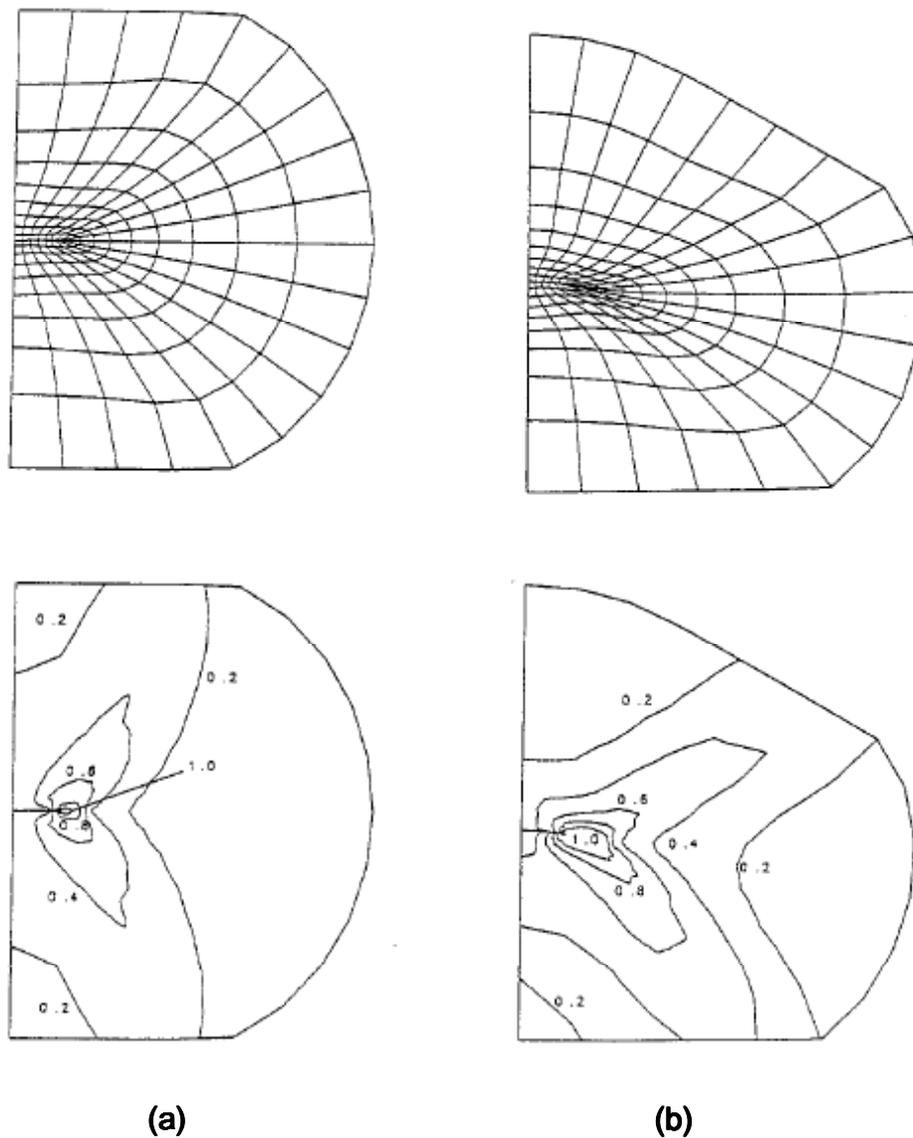


Figura 3.21: Comparação da configuração da malha e a deformação efetiva entre (a) matrizes planas e (b) com formato em V ⁽⁷⁾.

WANG ⁽³²⁾ também mostrou a influência do formato da matriz no fechamento de vazios. Simulações por elementos finitos mostraram que matriz plana deforma áreas globais, e matriz com formato em V deforma áreas centrais (Fig. 3.22). Além disso, a matriz em V proporciona um mais rápido fechamento do vazio com uma menor redução em relação à matriz plana.

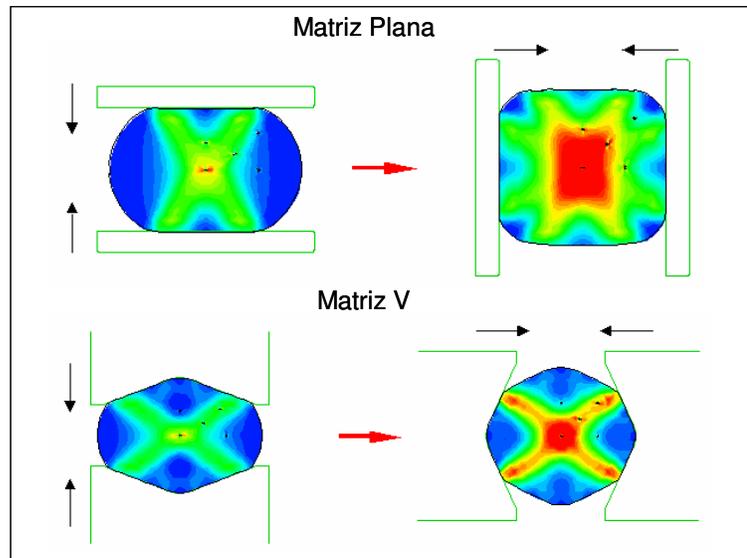


Figura 3.22: Comparação dos níveis de deformação entre matrizes planas e com formato em V ⁽³²⁾.

Extrapolando os resultados discutidos acima para a laminação a quente, que também é um processo de compressão pura, as matrizes planas podem se relacionar com cilindros planos ou com fundo plano (canais caixa e quadrado), e as matrizes com formato em V podem ser relacionadas com os canais ovais.

3.3.7. Alargamento e encruamento do material

WANG *et al.* ⁽³⁾ através de simulação por elementos finitos, mostraram que valores altos de tensão e deformação de cisalhamento são favoráveis ao fechamento de poros. Aumentando o coeficiente de atrito em simulação, sobe a tensão e deformação de cisalhamento, implicando que o aumento do atrito entre os cilindros e a peça pode melhorar a eliminação do poro. Apesar destas tensões e deformações de cisalhamento serem úteis, elas não são condições necessárias para o fechamento do poro.

STAHLBERG ⁽¹²⁾ mostrou a influência do atrito de acordo com simulação por elementos finitos. Devido ao alto atrito envolver grande alargamento é bastante razoável que alto atrito seja favorável no fechamento de vazios. De acordo com o modelo, é mais difícil fechar um poro central longitudinal em um aço alto manganês (0,50%C, 0,40%Si, 24,0%Mn) do que em um aço alta liga (1,30%C, 0,25%Si, 0,30%Mn, 0,5%Cr, 1,8%W). Isto é porque o aço alto manganês mostra menor alargamento, onde o valor do parâmetro d (coeficiente para o tipo de aço laminado) da equação de alargamento de Wusatowski é menor comparado com o do aço alta liga (Fig. 3.23). Vale ressaltar que este resultado é válido para laminação em cilindros planos paralelos, sem giro do material em 90°.

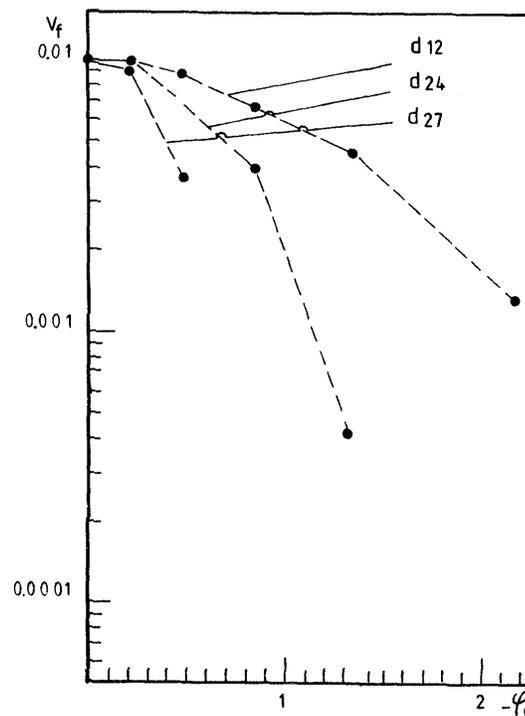


Figura 3.23: Influência do parâmetro d da equação de alargamento de Wusatowski, caracterizando o material laminado, na diminuição da fração de vazios para redução máxima por passe. Os vazios são fechados após o último passe para cada programa de laminação ⁽¹²⁾.

$d_{12} = 0,99741$ (aço alto Mn: 0,50%C – 0,40%Si – 24,0%Mn)

$d_{24} = 1,00902$ (aço alta liga: 1,30%C – 0,25%Si – 0,30%Mn – 0,5%Cr – 1,8%W)

$d_{27} = 1,02719$ (aço alto Ni: 0,40%C – 1,90%Si – 0,60%Mn – 2,0%Ni – 0,3%Cr)

φ_n : redução natural

V_f : fração volumétrica do vazios

Análises teóricas e observações experimentais de WALLERO ⁽¹⁴⁾ indicaram que condições de laminação que resultam em grande alongamento – especialmente à meia altura da amostra – são vantajosas no fechamento de poros.

TANAKA *et al.* ⁽³³⁾ realizaram simulações por elementos finitos no forjamento a quente e concluíram que quanto maior o expoente de encruamento do material, mais difícil é o fechamento do vazio (Fig. 3.24).

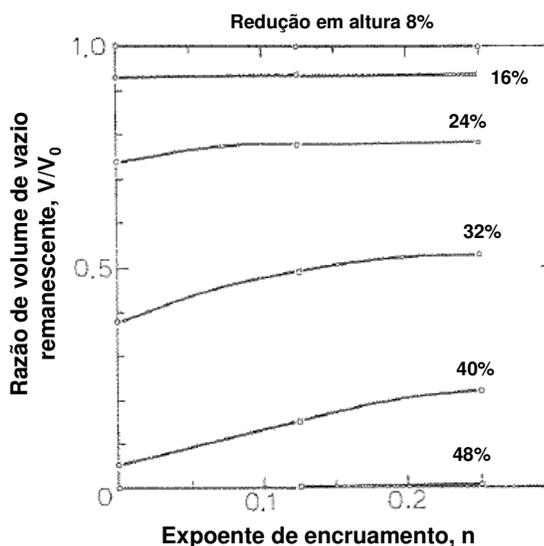


Figura 3.24: Efeito do expoente de encruamento na razão de volume de vazio remanescente ⁽³³⁾.

3.4. Laminação de Fio-Máquina

3.4.1. Fluxo de produção

O processo de laminação é definido como à quente quando ele é conduzido em temperaturas absolutas acima da metade do ponto de fusão do material, em graus Kelvin. No processo de laminação de fios-máquina, o material é aquecido a temperaturas situadas entre 700 a 1250°C.

O fluxo de processo do Laminador 2 da ArcelorMittal Monlevade, é mostrado na figura 3.25, e de uma forma simplificada, consiste de:

- Forno de reaquecimento de tarugos tipo soleira caminhante (“Walking Beam”): aquecem os tarugos de seção quadrada de 155 x 155 mm da temperatura ambiente até a temperatura de laminação específica para cada tipo de aço/bitola.
- Descarepador: Consiste de jatos de água de alta pressão cuja função é remover a carepa gerada no processo de reaquecimento.
- Laminador: Consiste de 28 cadeiras agrupadas em trem desbastador (6 cadeiras), trem intermediário (10 cadeiras), pré-acabador (2 cadeiras) e bloco acabador (10 cadeiras). Possui uma configuração de canais oval-redondo alternados a partir da 3ª cadeira, e é dividido em duas linhas de laminação: via Stelmor® para bitolas de 5,50 a 22,50 mm, e via bobinadeiras Garret® para bitolas de 23,81 a 44,00 mm. Possui também 4 caixas d’água intermediárias para controle da temperatura de laminação.
- Zona de resfriamento a água: tem a função de controlar a temperatura no final da laminação para o resfriamento ao ar posterior. Consiste de 4 caixas d’água em seqüência.
- Zona de resfriamento ao ar (Stelmor®): trata-se de uma esteira de rolos com ventilação forçada através de ventiladores com o objetivo de resfriar o fio-máquina para garantir as propriedades físicas e metalúrgicas.

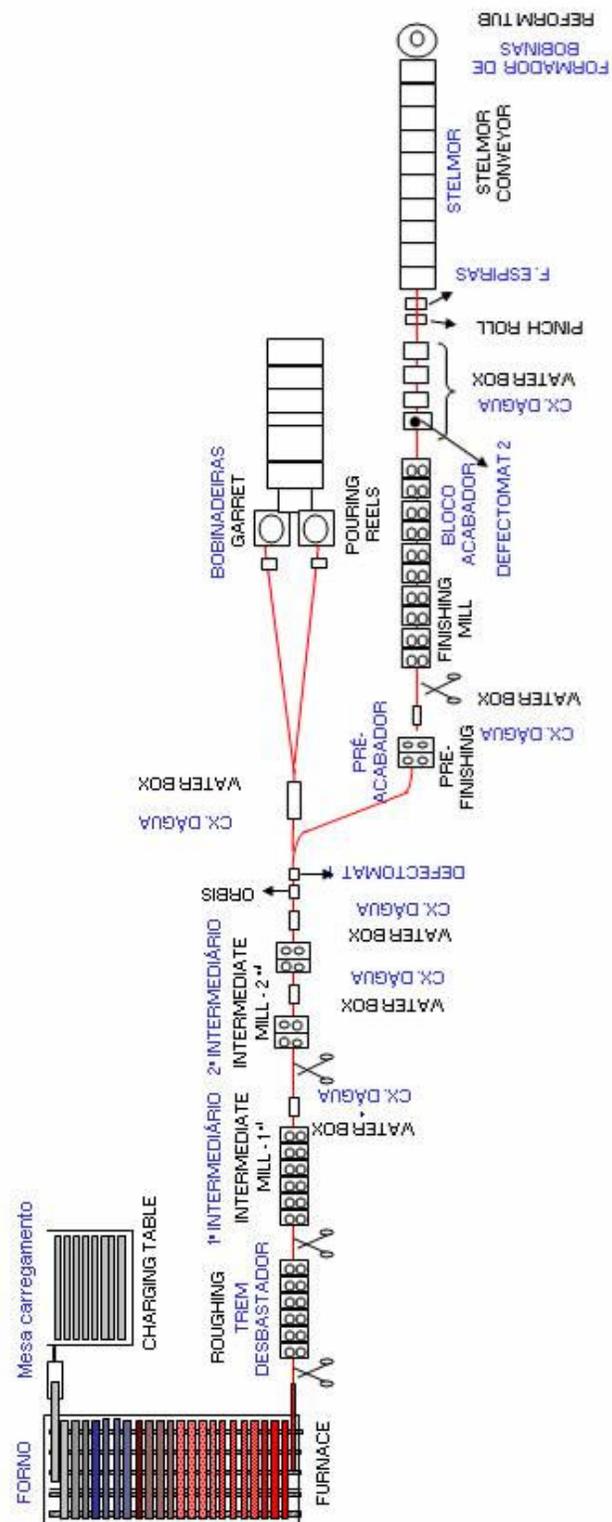


Figura 3.25: Fluxo de processo do Laminador 2 de fio-máquina da ArcelorMittal Monlevade.

3.4.2. A deformação na laminação de fio-máquina

A deformação de fio-máquina distingue-se da laminação de planos pelo uso de canais nos cilindros ao invés de mesa lisa e pelas dimensões do material, principalmente da menor relação altura x largura do material. Na laminação de fio-máquina ocorre além da redução em altura e alongamento da barra, alargamento do material, diferindo das condições de deformação plana da laminação de placas. O alargamento do material varia em função dos seguintes fatores ⁽³⁴⁾:

- Redução em altura;
- Diâmetro dos cilindros;
- Temperatura de laminação;
- Largura inicial do material;
- Velocidade de laminação;
- Teores de C, Cr, Mn e Ni do aço.

As deformações na laminação de fio-máquina são, em média, distribuídas da seguinte maneira: reduções médias no desbaste (20 a 25%), altas no intermediário (20 a 30%) e baixas no acabamento (15 a 20%), e como regra geral, reduções acima de 35% não devem ser praticadas como o risco de sobrecarregar os motores do laminador, dificultar a mordida do material nos cilindros, aumentar a quantidade de defeitos, dentre outras perturbações. Conforme discutido no item 3.2, os principais parâmetros de processo que influenciam no fechamento de porosidade na laminação são: redução de área, temperatura, velocidade de laminação e relação R/h_0 . Na laminação de fio-máquina estas variáveis possuem diferenciais em relação à laminação de planos, como será discutido nos parágrafos seguintes.

A capacidade de redução em cada cadeira depende do formato do canal, sendo maior do redondo para o oval do que do oval para o redondo, conforme mostra a figura 3.26⁽³⁴⁾. Além disso, o passe quadrado-oval também possui um alto potencial de redução em área, em torno de 25 a 30%.

A temperatura tem uma grande influência na laminação, afetando o alargamento e deformação, as condições de mordida da barra nos cilindros, a resistência à deformação e esforços, as propriedades mecânicas e a estrutura metalúrgica do material.

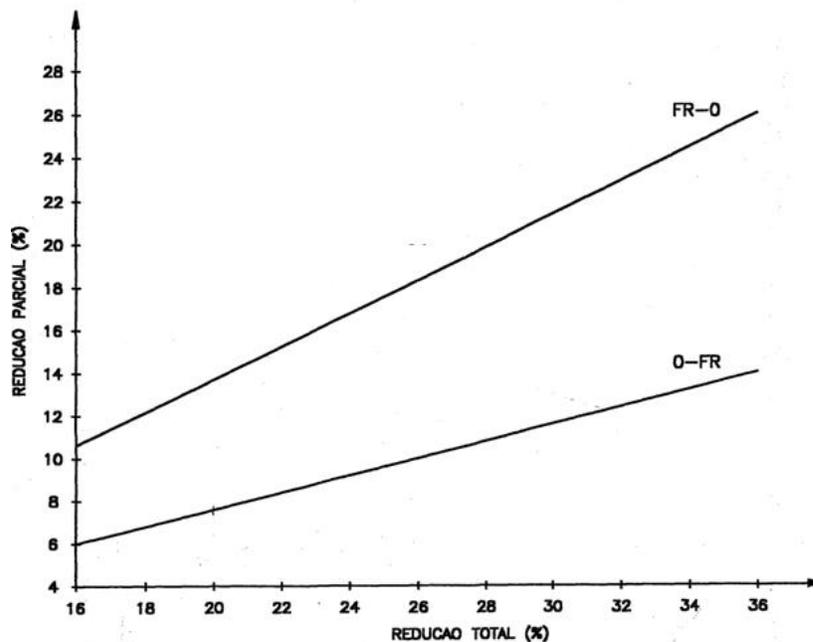


Figura 3.26: Capacidade de redução parcial para canais Falso Redondo-Oval e Oval-Falso Redondo em função da deformação total ⁽³⁴⁾. $\lambda = 0,57$.

A velocidade de laminação influencia o alargamento do material, a carga de laminação, as condições de mordida do material e a tração entre as cadeiras, além da produtividade do laminador. As velocidades finais no laminador de fio-máquina variam de 3,3 a 100 m/s de acordo com a bitola final.

Nas operações de desbaste e laminação intermediária, são usados cilindros de ferro fundido ou aço, e nas operações acabadoras são usados roletes de carboneto de tungstênio. O diâmetro dos cilindros e roletes diminui de acordo com a seqüência de laminação e dimensão da barra laminada, e as menores relações R/h_0 são encontradas nas cadeiras iniciais. O diâmetro de trabalho, que representa o diâmetro médio dos cilindros na zona do canal, é utilizado para o cálculo das velocidades de laminação.

4. METODOLOGIA

4.1. Material

Foram utilizados aços baixo carbono e aços ligados, produzidos na ArcelorMittal Monlevade, e cujas composições químicas típicas são mostradas na Tabela IV.1.

Tabela IV.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 do laboratório do DEMET/UFMG, corpos de prova de seção transversal retangular e com furo central criado artificialmente foram usinados a partir de tarugos dos dois aços. As dimensões do corpo de prova são ilustradas na figura 4.1, com furo central com 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. A utilização de uma rolha metálica foi realizada no experimento realizado por PARK ⁽¹¹⁾.

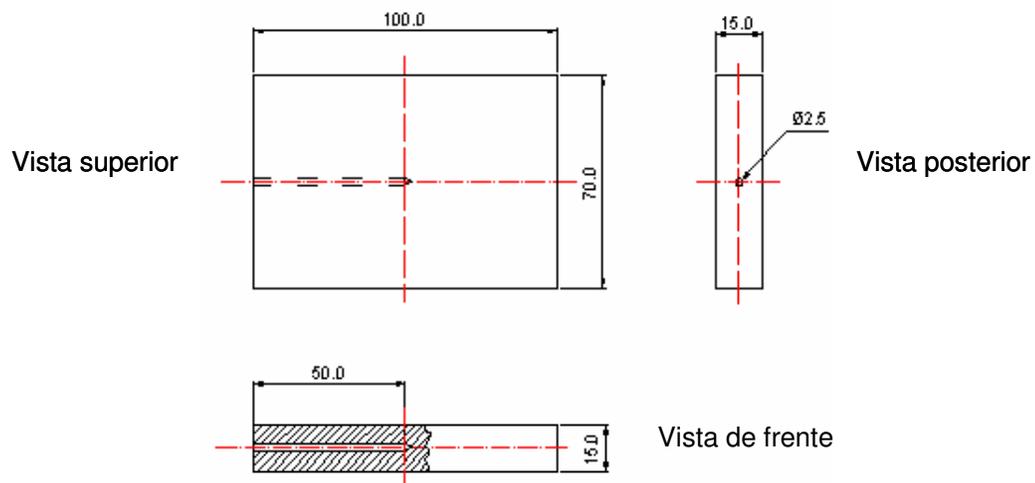
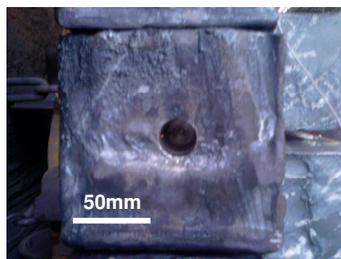


Figura 4.1: Dimensões (em mm) do corpo de prova para a laminação experimental no laminador de planos do laboratório do DEMET/UFMG.

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 figura 4.2 mostra as etapas de preparação do tarugo. Foi realizada uma limpeza do furo para remover resíduos de óleo de lubrificação. 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.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.2: Etapas da preparação do tarugo de aço baixo carbono: (a) Usinagem do furo, (b) Tarugo com furo de 26 mm de diâmetro e 100 mm de profundidade, (c) tarugo fechado com rolha metálica, (d) rolha metálica soldada.

4.2. Experimentos

A metodologia utilizada foi o Planejamento de Experimento (PDE), que consiste de testes nos quais são realizadas modificações propositalmente em determinados parâmetros controláveis de processo, de forma a identificar e quantificar mudanças nos parâmetros de produto em processo ou de produto final⁽³⁰⁾. É importante definir a linguagem utilizada no Planejamento de Experimento:

- Variável resposta: é o que se deseja melhorar ao se realizar um experimento;
- Fatores (ou variáveis): variáveis que são deliberadamente alteradas (testadas) em um experimento, com o objetivo de avaliar o efeito que elas exercem sobre a variável resposta e escolher a melhor condição de operação do processo;
- Níveis de um fator: representam as possíveis condições que um fator pode assumir em um experimento;
- Ensaio: corresponde ao teste realizado em uma determinada condição experimental.

Para a realização do Planejamento de Experimento foram seguidas as seguintes etapas:

- 1) Análise técnico-científica: Identificação dos fatores influentes;
- 2) Análise de engenharia: Identificação dos níveis de trabalho;
- 3) Experimento fatorial completo com réplicas: Descoberta da influência dos fatores e a interação entre eles na variável resposta;
- 4) Experiência confirmatória: Confirmação em nível industrial, utilizando-se a melhor condição indicada nos experimentos.

Para o fechamento da porosidade central foram selecionados os fatores temperatura de laminação, redução de área e velocidade de laminação, através da análise técnico-científica (revisão bibliográfica). Os níveis dos fatores controláveis foram escolhidos de acordo com análise de engenharia, e em níveis tais que são possíveis de se executar no processo atual. Na laminação em mesa lisa foi realizado um PDE completo e na laminação de fio-máquina foi realizado um PDE completo com duas réplicas. Após a identificação dos melhores níveis dos fatores para o fechamento da porosidade central, um ensaio confirmatório foi realizado na laminação de fio-máquina ajustando-se as condições para o processo otimizado.

4.2.1. Laminação de Planos

O experimento com laminação de planos foi realizado no Laboratório de Conformação Mecânica do DEMET/UFMG. Foram estudadas as influências da redução de área, temperatura de conformação, velocidade de laminação e tipo de aço no fechamento da porosidade central artificialmente criada em corpo de prova com as dimensões da

Figura 4.1, através de um Planejamento de Experimento 2^4 (4 variáveis e 2 níveis, totalizando 16 ensaios). Os níveis de cada variável são mostrados na tabela IV.2, e o arranjo do experimento é mostrado na tabela IV.3.

Tabela IV.2: Fatores e níveis dos ensaios do Planejamento de Experimento no laminador de planos do laboratório do DEMET/UFMG.

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

Tabela IV.3: Arranjo dos fatores e seus níveis para os 16 ensaios no laminador de planos do laboratório do DEMET/UFMG.

BTC: Aço com baixo Teor de Carbono

LIG: Aço ligado

Ordem	Temperatura (°C)	Redução (%)	Velocidade (m/s)	Aço
1	950	20	0,10	LIG
2	950	20	0,42	LIG
3	950	20	0,10	BTC
4	950	20	0,42	BTC
5	950	30	0,10	LIG
6	950	30	0,42	LIG
7	950	30	0,10	BTC
8	950	30	0,42	BTC
9	1050	20	0,10	LIG
10	1050	20	0,42	LIG
11	1050	20	0,10	BTC
12	1050	20	0,42	BTC
13	1050	30	0,10	LIG
14	1050	30	0,42	LIG
15	1050	30	0,10	BTC
16	1050	30	0,42	BTC

Para aquecimento das amostras foi utilizado um forno tipo mufla, ilustrado na figura 4.3, com controlador de temperatura programável CC405. Um termopar foi colocado em contato com a superfície do corpo de prova para medição da temperatura superficial do material. Os corpos de prova foram colocados no forno já pré-aquecido, e depois que o corpo de prova atingiu a temperatura de laminação, o mesmo foi mantido por mais 15 min no forno para encharque.

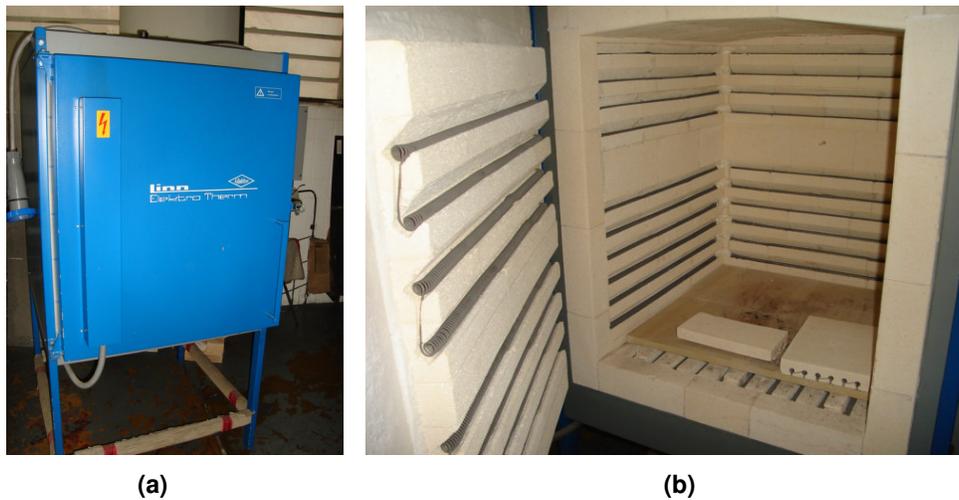


Figura 4.3: Forno tipo mufla: (a) visão geral e (b) visão interna.

A laminação foi realizada em um Laminador Duo à quente, marca FRÖHLING (Figura 4.4), com cilindros de 200 mm de diâmetro e com 250 mm de comprimento da mesa. Foi realizado apenas um passe de laminação para cada condição devido à brusca queda de temperatura do corpo de prova durante a laminação. O ajuste da luz entre os cilindros foi realizado baseando-se na deformação verdadeira ($\ln(h_0/h)$). As cargas foram registradas em todas as condições de laminação através do programa Analógica Fröhling, versão 1.4. Após a laminação os corpos de prova foram resfriados ao ar.



Figura 4.4: Laminador Duo à Quente utilizado nos experimentos.

4.2.2. Laminação em canais (Fio-máquina)

Os experimentos na laminação em canais foram realizados no laminador de fio-máquina da ArcelorMittal Monlevade, cujo fluxo de processo é mostrado na Figura 3.25. Foram realizados ensaios através de um Planejamento de Experimento 2^3 (3 variáveis e 2 níveis, totalizando 8 ensaios), utilizando como variáveis: temperatura de laminação medida na entrada da cadeira 3, redução de área nas cadeiras 3 e 5 com canais ovais e velocidade de laminação da cadeira 6. O nível dos fatores foi definido conforme mostrado na tabela IV.4, e a tabela IV.5 mostra o arranjo completo das variáveis para os 8 ensaios. De forma indireta foi também analisada a influência da relação D/h_0 , pela mudança da altura de entrada do material nos canais redondos.

Tabela IV.4: Fatores e níveis dos ensaios do Planejamento de Experimento no laminador de fio-máquina número 2 da ArcelorMittal Monlevade.

Fatores	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

Tabela IV.5: Arranjo dos fatores e seus níveis para os 8 ensaios realizados no laminador de fio-máquina número 2 da ArcelorMittal Monlevade.

Ordem	Temperatura (°C)	Redução (%)	Velocidade (m/s)
1	970	35	0,97
2	970	35	1,22
3	970	30	0,97
4	970	30	1,22
5	910	30	0,97
6	910	30	1,22
7	910	35	0,97
8	910	35	1,22

Os tarugos foram aquecidos no forno 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 R 14C05, instalado na entrada da cadeira 3. A figura 4.5 ilustra a configuração dos canais e da barra laminada nos cilindros da cadeira 1 até a cadeira 6 no laminador 2 da ArcelorMittal Monlevade. Amostras de 500 mm de comprimento foram retiradas da cauda dos tarugos laminados através da tesoura posicionada na saída da cadeira 6.

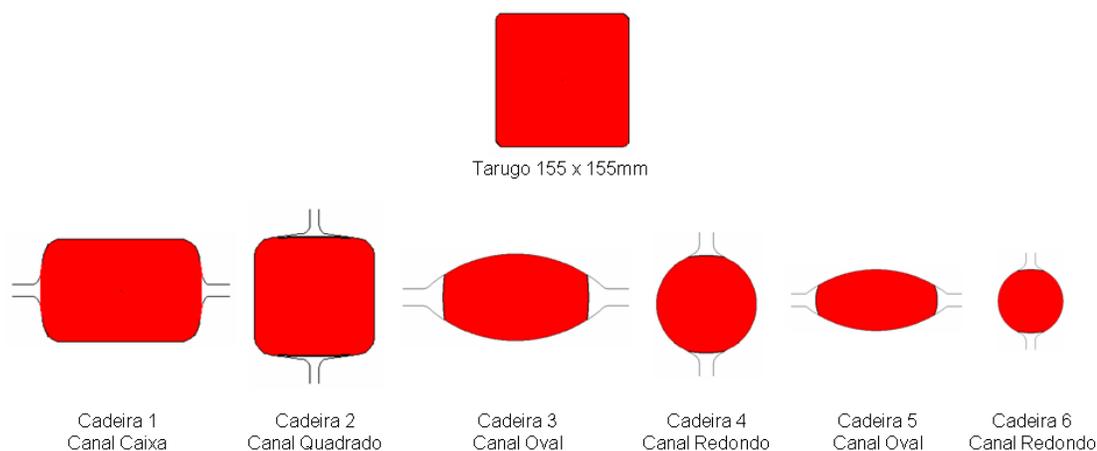


Figura 4.5: Esquema do fluxo de deformação do tarugo no laminador 2 da ArcelorMittal Monlevade, das cadeiras 1 a 6.

Foram selecionadas as cadeiras 3 e 5 devido a maior capacidade de redução do canal oval, de acordo com a figura 3.26, e concentração de deformação localizada no centro do material, conforme figura 3.22. As luzes entre os cilindros foram definidas, para a obtenção das reduções pretendidas, através do programa de calibração WICON ROLLING[®]. As luzes dos cilindros com canais redondos também foram ajustadas para não se alterar a redução de área nestes canais nas condições de 30 e 35% de redução nos canais ovais.

4.3. Caracterização da porosidade

A porosidade remanescente foi examinada em seção transversal. Os corpos de prova da laminação em mesa lisa foram cortados com disco abrasivo com lubrificação em uma máquina denominada Policorte, marca Arotec. As amostras da laminação de fio-máquina foram usinadas até um diâmetro de 26 mm e depois cortadas com disco abrasivo conforme descrito acima.

Após o corte, as amostras foram abrandadas com lixas d'água de grãos #60, #120, #320 e #600. As amostras foram então polidas com pasta sintética de diamante de 9 e 3 μm . Ao final do preparo, as amostras foram quimicamente atacadas com reativo nital 2% (20 mL de ácido nítrico e 980 mL de álcool etílico) para observação visual.

As amostras da laminação em mesa lisa e da laminação de fio-máquina foram analisadas em estereoscópio, 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 utilizando-se o programa Microsoft® EXCEL 2003, através da ferramenta de análise de regressão ⁽³⁴⁾. As etapas para a construção do modelo de regressão estão descritas no fluxograma da figura 4.6.

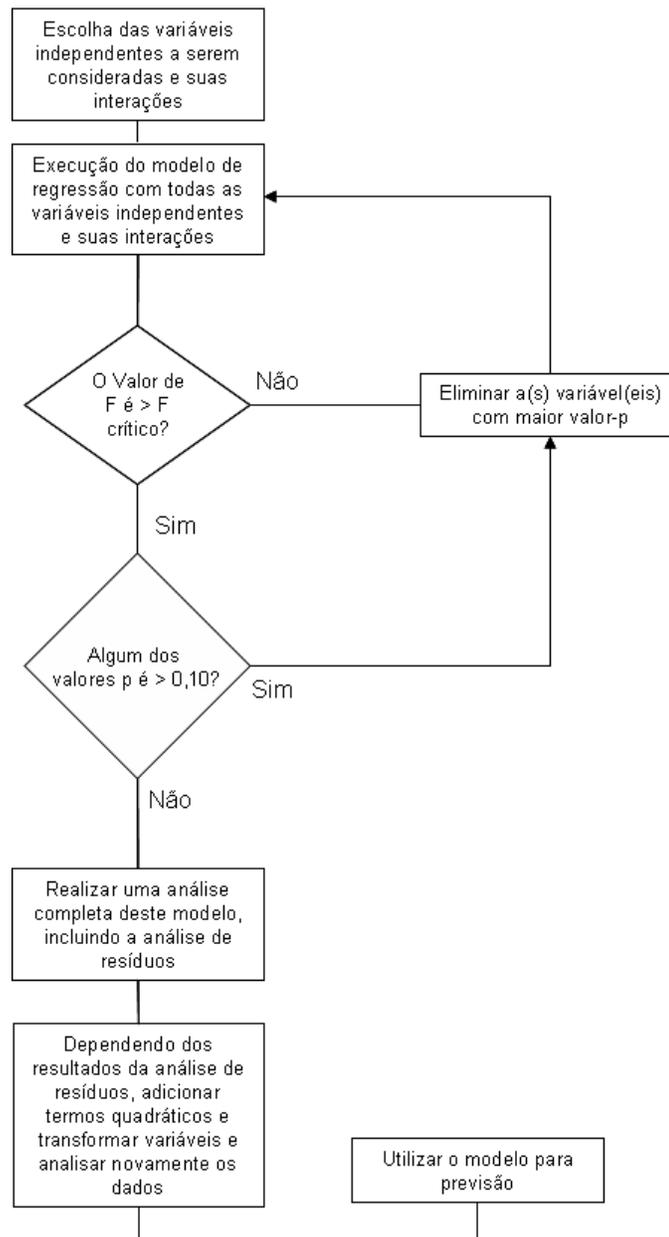


Figura 4.6: Roteiro para a construção do modelo de regressão.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Laminação de Planos

5.1.1. Caracterização da porosidade

A figura 5.1 ilustra as macrografias dos poros após a realização dos experimentos, conforme condições definidas na tabela IV.3. Todos os poros apresentaram um formato tipo elipse, com o eixo maior paralelo ao eixo do cilindro de laminação.

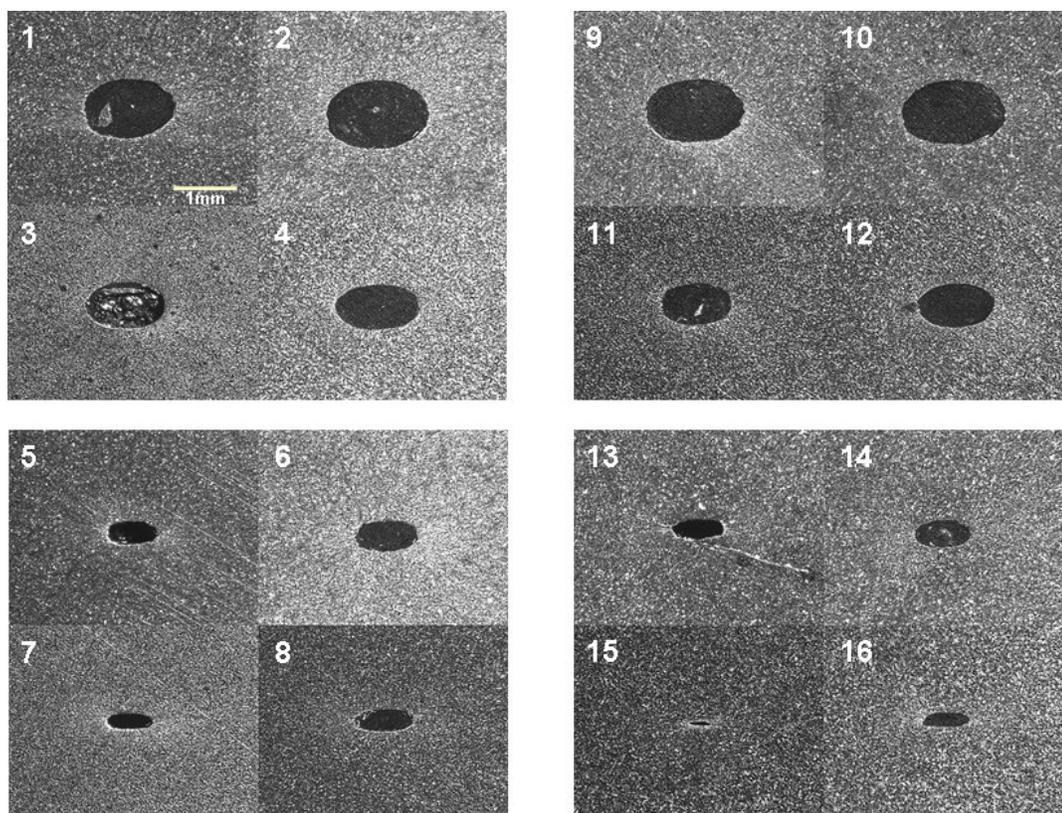


Figura 5.1: Macroestrutura da seção transversal dos corpos de prova da laminação em mesa lisa de acordo com a tabela IV.3. Ataque nital 2%. Aumento 24X.

A tabela V.1 mostra os resultados referentes à área do poro remanescente e a carga de laminação. Pode-se observar que, nas mesmas condições testadas, o aço baixo carbono apresentou menor porosidade remanescente e menor carga de laminação do que o aço ligado.

Tabela V.1: Área do poro remanescente e carga de laminação para o PDE realizado no laminador de planos em laboratório.

BTC: Aço Baixo Carbono

LIG: Aço Ligado

Ordem	Temperatura (°C)	Redução (%)	Velocidade (m/s)	Aço	ÁREA (mm ²)	CARGA (kN)
1	950	20	0,10	LIG	1,08	300
2	950	20	0,42	LIG	1,37	314
3	950	20	0,10	BTC	0,72	249
4	950	20	0,42	BTC	0,74	268
5	950	30	0,10	LIG	0,22	398
6	950	30	0,42	LIG	0,38	425
7	950	30	0,10	BTC	0,13	305
8	950	30	0,42	BTC	0,26	323
9	1050	20	0,10	LIG	1,18	223
10	1050	20	0,42	LIG	1,29	251
11	1050	20	0,10	BTC	0,58	183
12	1050	20	0,42	BTC	0,64	203
13	1050	30	0,10	LIG	0,21	296
14	1050	30	0,42	LIG	0,30	319
15	1050	30	0,10	BTC	0,02	237
16	1050	30	0,42	BTC	0,13	257

A figura 5.2 ilustra a relação entre a área da porosidade e a sua razão largura/altura. Verifica-se uma tendência de que quanto menor a área do poro, maior a sua razão largura/altura, indicando uma maior redução em altura do poro em relação à sua largura.

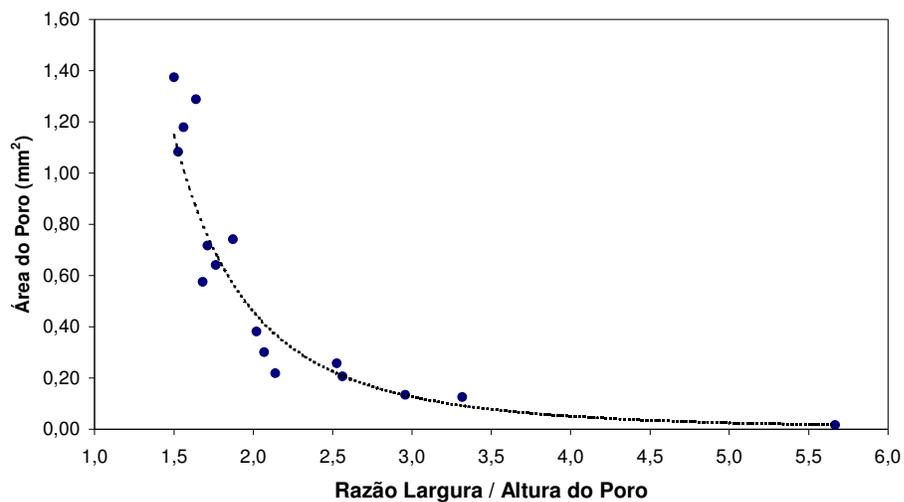


Figura 5.2: Relação entre a área e a razão largura / altura do poro.

5.1.2. Análise Estatística

Através dos dados da tabela V.1 foi realizada uma análise de regressão, de acordo com o fluxo da figura 4.6, para verificar a influência das variáveis do experimento na área da porosidade após laminação. Foram incluídas na análise do modelo de regressão as interações entre as variáveis independentes, sendo:

AT: Aço x Temperatura

AR: Aço x Redução

AV: Aço x Velocidade

TRV: Temperatura x Redução x Velocidade

ATRV: Aço x Temperatura x Redução x Velocidade

O resumo dos resultados do modelo de regressão escolhido é mostrado na tabela V.2.

Tabela V.2: Resumo dos resultados da regressão múltipla para o experimento no laminador de planos.

<i>Estatística de regressão</i>	
R-Quadrado	0,997
R-quadrado ajustado	0,993
Erro padrão	0,037
Observações	16

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

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
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

Para um nível de significância de 0,10, o valor crítico da distribuição F ($F_{8,7}$) é 2,752. Uma vez que $F(275,25) > F_{8,7}(2,752)$, e para cada variável o valor-p $\leq 0,10$, conclui-se que as variáveis do modelo são significantes e estão relacionadas com a área do poro. Através do valor do coeficiente de determinação múltipla ajustado, pode-se dizer

que 99,3% da variação nas áreas da porosidade podem ser explicadas através do modelo de regressão múltipla, ajustado para o número de variáveis e tamanho da amostra. A equação do modelo de regressão é:

$$\begin{aligned} \text{Área do Poro} = & 2,99543 + 0,00093T - 0,12062R + 2,45078V - \\ & - 0,00108AT + 0,03157AR - 1,30028AV - \\ & - 0,00007TRV + 0,00004ATRV \end{aligned} \quad (3.3)$$

A figura 5.3 mostra o gráfico da área calculada através da equação acima versus a área real da porosidade. O gráfico da figura 5.4 mostra os resíduos em relação aos valores previstos para a área da porosidade, onde não se percebe nenhum padrão nesta relação (distribuição aleatória dos resíduos).

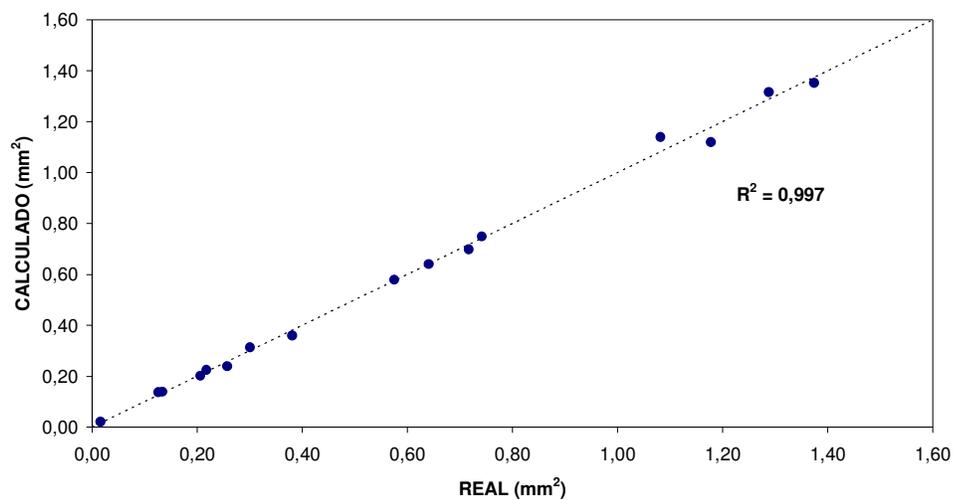


Figura 5.3: Correlação entre a área calculada pelo modelo de regressão e a área medida do poro (laminação de planos).

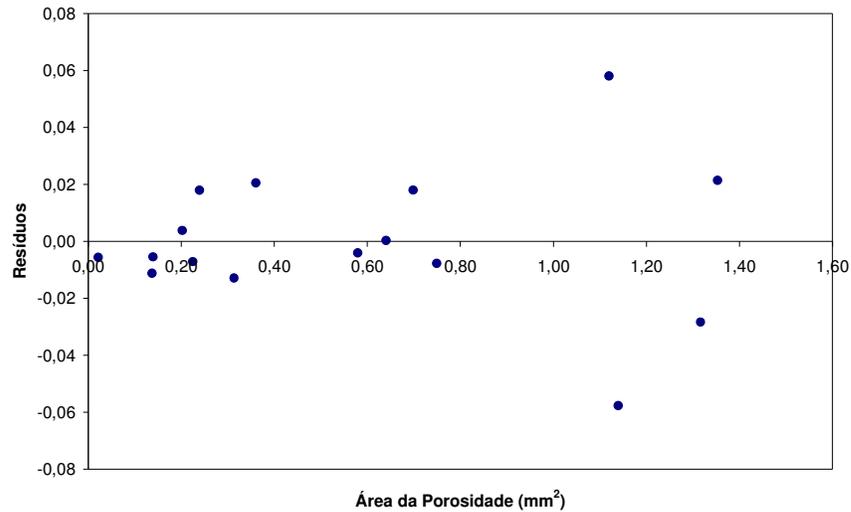


Figura 5.4: Relação de resíduos e a área da porosidade calculada pelo modelo de regressão (laminação de planos).

A figura 5.5 mostra a relação entre os resíduos e as variáveis do modelo de regressão. Padrões no gráfico de resíduos versus a variável explanatória podem indicar a existência de um efeito quadrático e, portanto, indicar a necessidade de ser adicionada uma variável explanatória quadrática ao modelo de regressão múltipla ⁽³⁴⁾. Percebe-se uma maior dispersão dos resíduos nos menores valores de redução e temperatura, mas não é possível perceber nestes gráficos um padrão de distribuição dos resíduos. Desta forma, pode-se concluir que o modelo de regressão linear múltipla é apropriado.

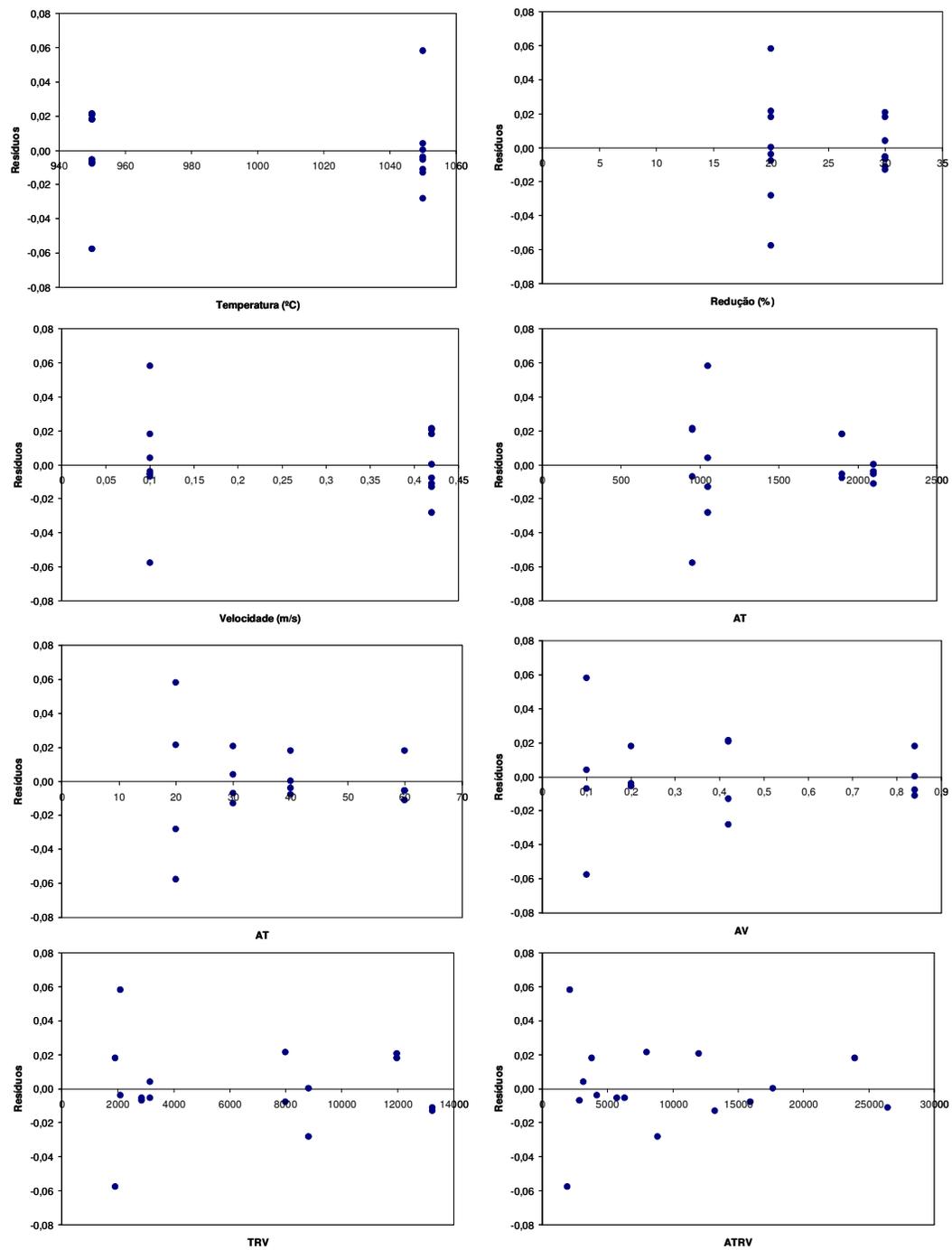


Figura 5.5: Relação de resíduos e as variáveis do modelo de regressão (laminação de planos).

Como o modelo de regressão inclui a interação Aço x Temperatura x Redução x Velocidade como significativa, para cada uma destas variáveis os ensaios foram

agrupados nos seus níveis e a média das respostas foram calculadas dentro dos grupos (níveis), e o diagrama de resposta da figura 5.6 indica a combinação destas variáveis para a menor área do poro após a laminação em mesa lisa. A carga de laminação média em cada nível também é mostrada na figura 5.6. O diagrama indicou a combinação de maior temperatura, maior redução de área e menor velocidade, como mais efetiva para o fechamento da porosidade, e ainda mostrou melhores resultados no aço baixo carbono do que no aço ligado. Com exceção da redução de área, as melhores condições coincidiram com as menores cargas de laminação.

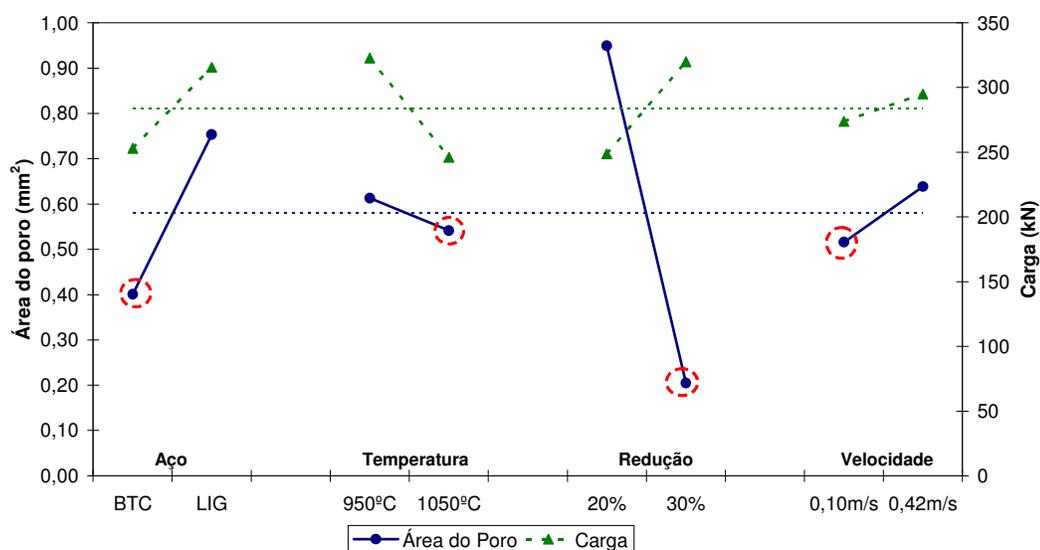


Figura 5.6: Diagrama de respostas da área do poro e da carga de laminação para as variáveis em seus dois níveis. Os círculos tracejados indicam a escolha dos melhores níveis para a menor área do poro remanescente após laminação.

Este resultado confirma a teoria de que maior temperatura de laminação, maior redução de área e menor velocidade de laminação favorecem o fechamento da porosidade na laminação de planos ^(3,16). 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. A combinação destas três variáveis de laminação nos seus melhores níveis é mais efetiva no fechamento da porosidade do que trabalhar isoladamente com uma variável apenas. As variáveis que influenciam na redução da carga de laminação favorecem o fechamento da porosidade central pois possibilitam que a tensão de compressão alcance o centro do material.

5.2. Laminação em canais (fio-máquina)

5.2.1. Caracterização da porosidade

As figuras 5.7 e 5.8 ilustram macrografias de algumas amostras com porosidade remanescente após a realização dos experimentos, conforme condições definidas na tabela IV.5. Os tarugos laminados nas condições de 35% de redução de área nos canais ovais (fig. 5.7) geralmente apresentaram porosidade com um formato tipo hexagonal, com lados retos. Esta forma da porosidade pode ser vista na saída do passe 2 (canal redondo) da figura 3.19 do trabalho de FILIPOVIC ⁽¹⁸⁾. Os tarugos laminados com 30% de redução nos canais ovais (fig. 5.8) não apresentaram um formato típico. A tabela V.3 mostra os resultados referentes à média da área do poro remanescente.

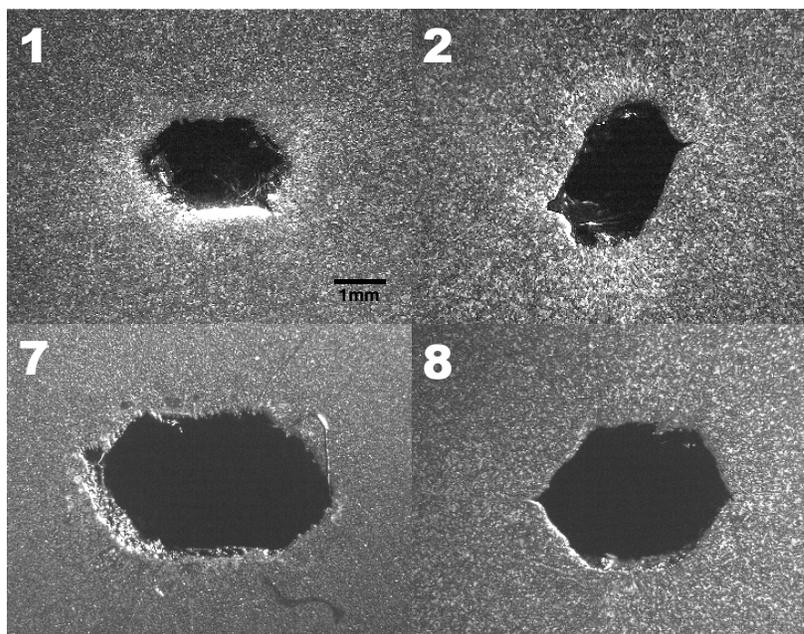


Figura 5.7: Macroestrutura da seção transversal das amostras da laminação em canais. Redução de 35% nos canais ovais conforme condição do ensaio da tabela IV.5. Ataque nital 2%. Aumento 12X.

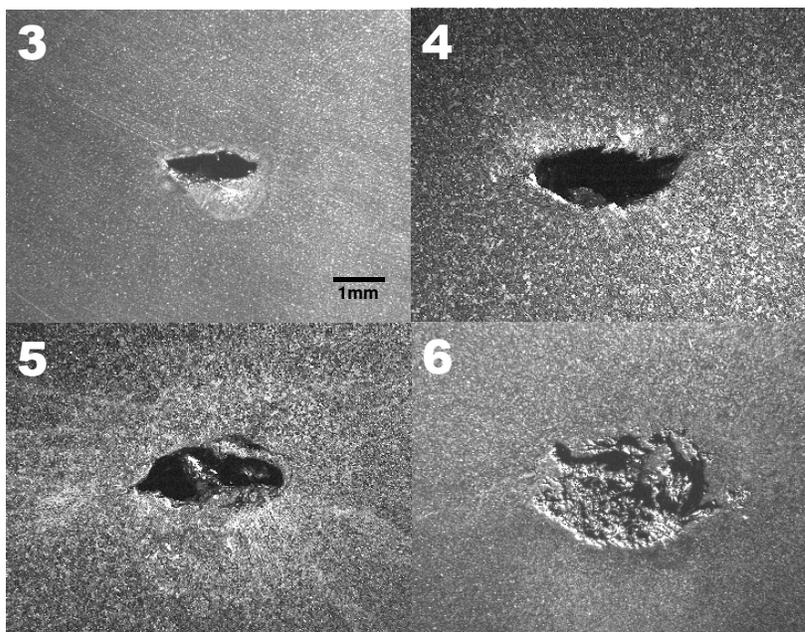


Figura 5.8: Macroestrutura da seção transversal das amostras da laminação em canais. Redução de 30% nos canais ovais conforme condição do ensaio da tabela IV.5. Ataque nital 2%. Aumento 12X.

Tabela V.3: Área média do poro remanescente do PDE realizado no laminador 2 de fio-máquina da ArcelorMittal Monlevade.

Ordem	Temperatura (°C)	Redução nos canais ovais (%)	Velocidade da cadeira 6 (m/s)	Área (mm ²)
1	962	35	0,97	5,64
2	975	35	1,22	5,74
3	965	30	0,97	3,26
4	982	30	1,22	5,36
5	907	30	0,97	6,28
6	923	30	1,22	5,57
7	905	35	0,97	9,24
8	919	35	1,22	6,28

Por se tratar de um experimento industrial, ocorreu uma variação da temperatura entre os ensaios dentro de cada nível testado. Esta variação pode ser devido às diferenças de velocidade de laminação entre cada ensaio, entre o tempo de forno (variável não controlável, dependente do ritmo de produção do laminador), poder calorífico do gás de aquecimento no forno, dentre outras.

5.2.2. Análise Estatística

Através dos dados da tabela V.3 foi realizada uma análise de regressão, de acordo com o fluxo da figura 4.6, para verificar a influência das variáveis do experimento na área da porosidade após laminação. Foram incluídas na análise do modelo de regressão as interações entre as variáveis independentes, sendo:

TV: Temperatura x Velocidade

TRV: Temperatura x Redução x Velocidade

O resumo dos resultados do modelo de regressão escolhido é mostrado na tabela V.4.

Tabela V.4: Resumo dos resultados da regressão múltipla para o experimento na laminação industrial em canais (fio-máquina).

<i>Estatística de regressão</i>	
R-Quadrado	0,999
R-quadrado ajustado	0,996
Erro padrão	0,100
Observações	8

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

Para um nível de significância de 0,05, o valor crítico da distribuição F ($F_{5,2}$) é 19,296. Uma vez que $F(374,938) > F_{5,2}(19,296)$, e para cada variável o valor-p $\leq 0,05$, conclui-se que as variáveis do modelo são significantes e estão relacionadas com a área do poro. Através do valor do coeficiente de determinação múltipla ajustado, pode-se dizer que 99,6% da variação nas áreas do poro podem ser explicadas através do modelo de regressão múltipla, ajustado para o número de variáveis e tamanho da amostra. A equação do modelo de regressão é:

$$\text{Área do Poro} = 181,815 - 0,255T + 1,952R - 191,071V + 0,255TV - 0,002TRV \quad (3.4)$$

A Figura 5.9 mostra o gráfico da área calculada através da equação do modelo de regressão versus a área real da porosidade. O gráfico da figura 5.10 mostra os resíduos em relação aos valores previstos para a área da porosidade, onde não se percebe nenhum padrão nesta relação (distribuição aleatória dos resíduos).

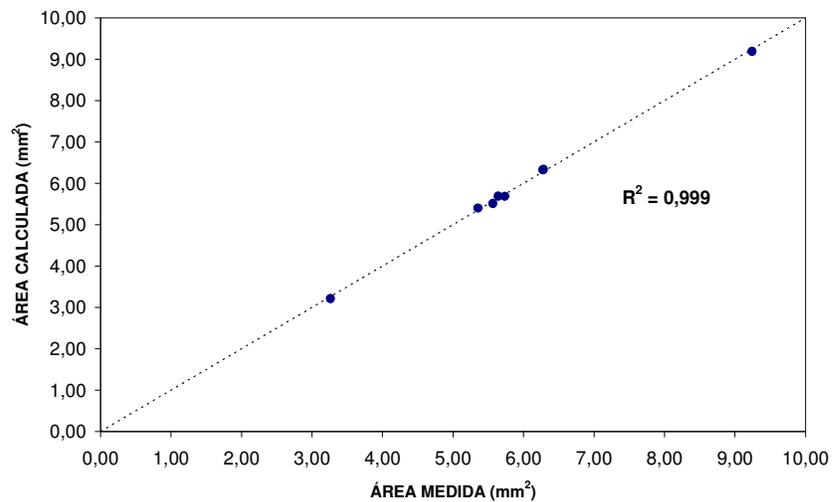


Figura 5.9: Correlação entre a área calculada pelo modelo de regressão e a área média do poro para a laminação em canais.

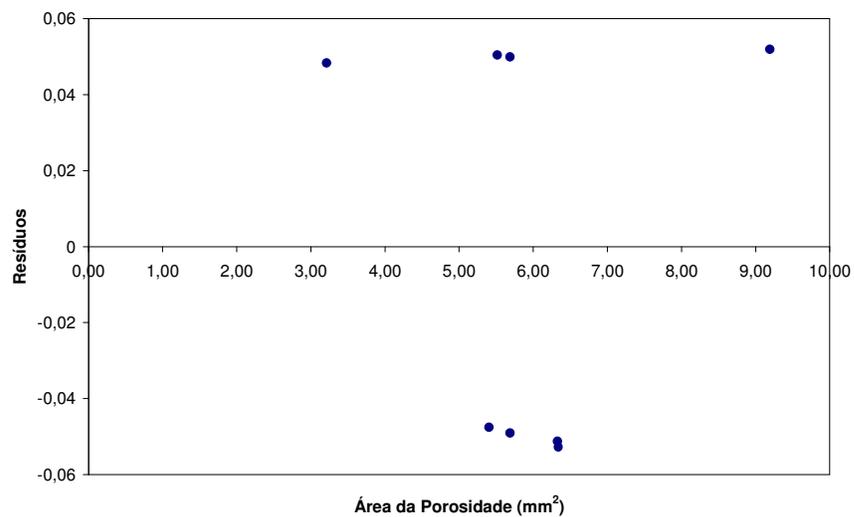


Figura 5.10: Relação de resíduos e a área da porosidade calculada pelo modelo de regressão (laminação em canais).

A figura 5.11 mostra a relação entre os resíduos e as variáveis do modelo de regressão. Não é possível perceber nestes gráficos um padrão de distribuição dos resíduos. Desta forma, pode-se concluir que o modelo de regressão linear múltipla é apropriado.

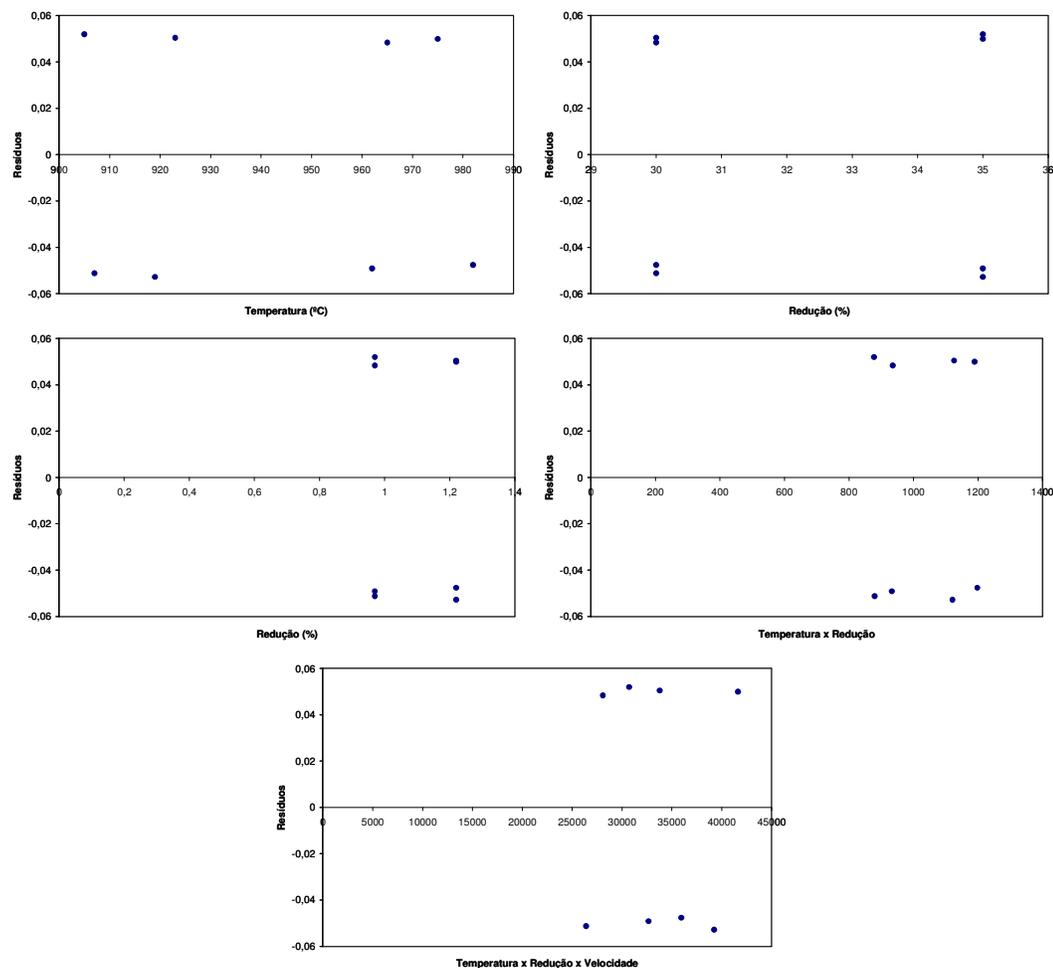


Figura 5.11: Relação de resíduos e as variáveis do modelo de regressão (laminação em canais).

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 foram calculadas dentro dos grupos (níveis). Através da análise dos diagramas de resposta da figura 5.12, a combinação de maior temperatura, menor redução de área nos canais ovais e menor velocidade, mostrou-se como mais efetiva para o fechamento da porosidade central. Este resultado confirma a

influência destas três variáveis também na laminação com seqüência de canais oval-redondo, mas com a redução no nível mais baixo nos canais ovais.

Este fato pode ser explicado olhando a figura 3.19 do trabalho de FILIPOVIC ⁽¹⁸⁾. 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 nos canais redondos é reduzida e conseqüentemente uma pressão menos favorável é introduzida nas proximidades do poro ⁽¹²⁾. Desta forma, o poro abre, aumentando-se a sua área, e a redução de altura do poro no canal redondo será menor.

A influência da menor velocidade, além de reduzir a carga de laminação, pode também influenciar no gradiente de temperatura entre a superfície e o centro do material. Em menor velocidade de laminação, o tempo de contato entre o material e o cilindro é maior, fazendo com que a superfície do material perca mais calor para o cilindro e para a água de refrigeração destes. Desta forma, o gradiente de temperatura entre superfície e centro do material aumenta, favorecendo uma maior concentração da tensão de compressão no centro ^(11,15).

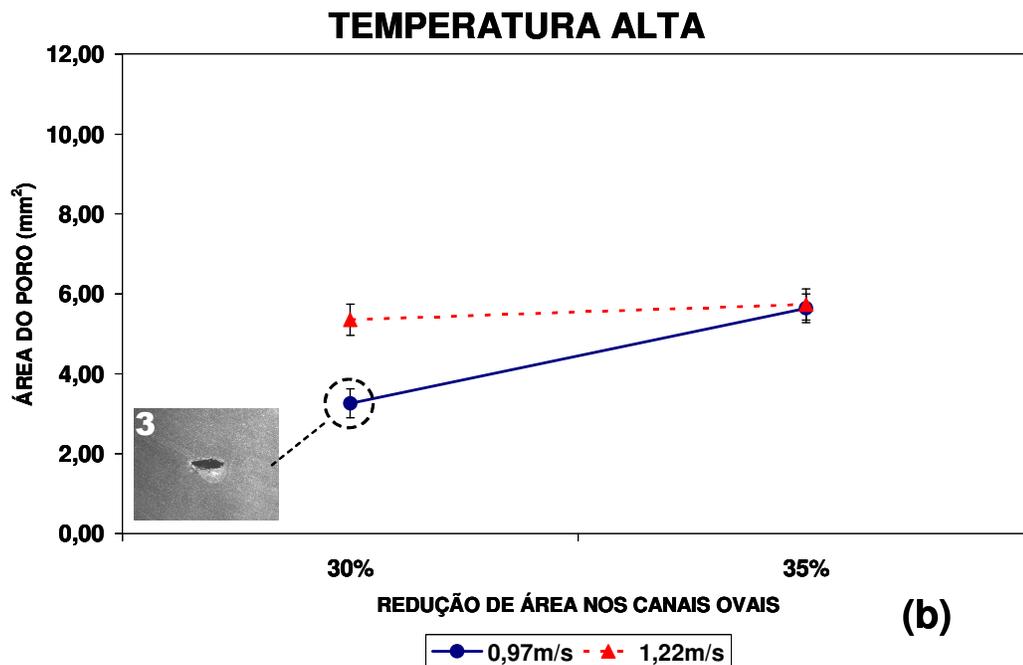
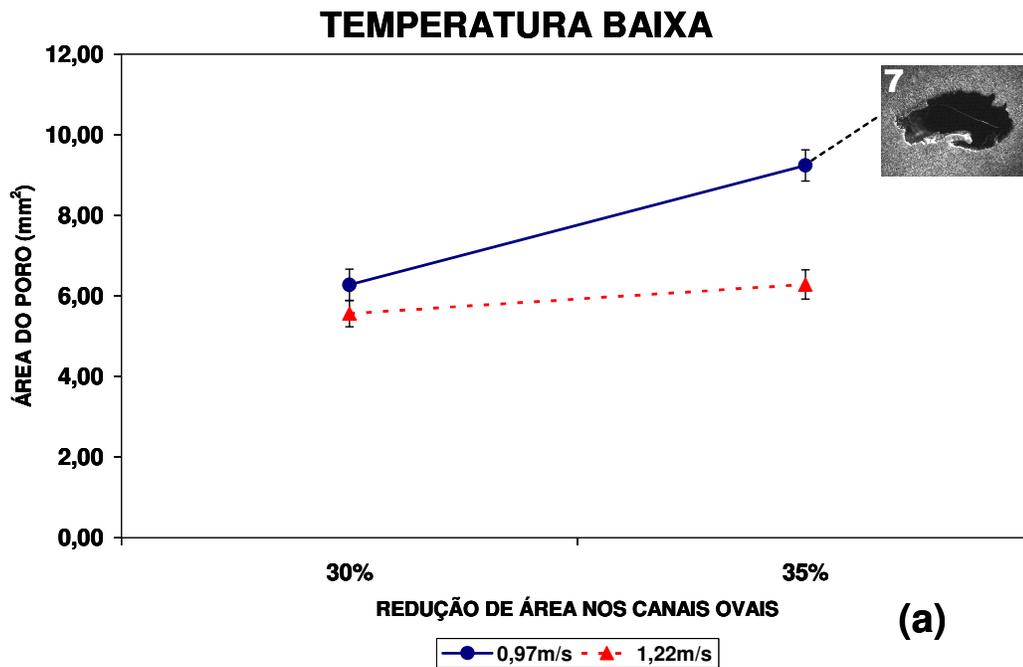


Figura 5.12: Diagramas de respostas da área do poro para as variáveis em seus dois níveis. O círculo tracejado indica a escolha do melhor nível para a menor área do poro remanescente para laminação em canais (fio-máquina). As linhas verticais em cada ponto representam o intervalo de confiança a 95%.

5.2.3. Experiência confirmatória

Para a confirmação da melhor condição indicada pelos experimentos, foram selecionados níveis de cada variável para o completo fechamento da porosidade central em uma experiência final confirmatória no laminador 2 de fio-máquina da ArcelorMittal Monlevade. Para a temperatura escolheu-se trabalhar no nível de 1000°C, mais alto do que o realizado no PDE. Esta escolha é devida ao fato que, além de fechar a porosidade, deseja-se soldar as superfícies do poro, conforme discutido por WANG ⁽³⁾. A velocidade da cadeira 6 foi mantida no nível mais baixo (0,97 m/s). A redução de área nos canais ovais foi reduzida para 27%, ajustando a luz dos demais cilindros para se manter as mesmas reduções nos canais redondos. Esta última condição favoreceu uma maior relação D/h_0 nos canais ovais.

De acordo com o modelo de regressão da equação 3.4, a área da porosidade final prevista nas condições descritas acima seria de 0,12 mm², e o intervalo de previsão é de -0,65 a 0,90 mm², que prevê a resposta que seria obtida para um valor individual. Como o valor do limite inferior do intervalo de previsão é -0,65, este não tem interpretação física, então o menor valor do poro previsto é zero, ou completamente fechado. Considerou-se nesta experiência confirmatória a extrapolação das variáveis temperatura e redução, uma vez que estes valores não foram utilizados na previsão do modelo original, portanto não estão contidos no intervalo relevante.

As macrografias da figura 5.13a e b mostram amostras da seção transversal do material na saída da cadeira 6. Na figura 5.13a os níveis testados são referentes ao ensaio número 1 da tabela IV.5 (temperatura = 970°C; velocidade = 0,97 m/s; redução = 35%), onde pode ser vista a porosidade central remanescente. Na figura 5.13b os níveis testados são conforme o experimento confirmatório, e a porosidade central não foi visualizada. A figura 5.13c mostra a região central da amostra com um aumento de 100x no MEV evidenciando o fechamento da porosidade central.

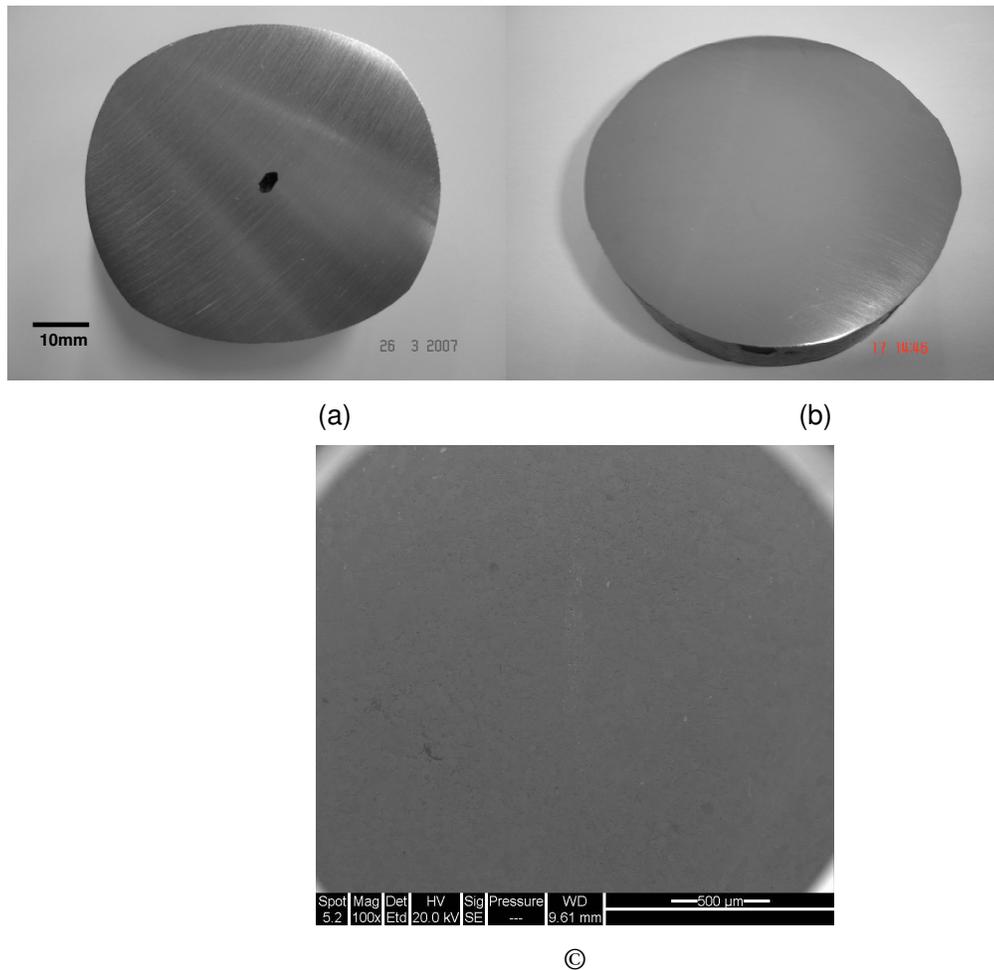


Figura 5.13: Seção transversal da amostra após cadeira 6. (a) Conforme condições do experimento 1 da tabela IV.5; (b) Conforme condições do experimento confirmatório; (c) Região central de (b) com aumento de 100x no MEV.

6. CONCLUSÕES

As análises realizadas dos resultados alcançados neste trabalho dão suporte às seguintes conclusões sobre a influência das seguintes variáveis no fechamento da porosidade central: temperatura de deformação (950-1050°C na laminação de planos e 900-1000°C na laminação de fio-máquina), redução de área (20-30% na laminação de planos e 27-35% nos canais ovais na laminação de fio-máquina) e velocidade de laminação (0,10-0,42 m/s na laminação de planos e 0,97-1,22 m/s na laminação de fio-máquina):

- A interação entre maior temperatura, maior redução de área e menor velocidade de laminação é mais efetiva para o fechamento da porosidade central na laminação de planos;
- Análise da seção transversal mostrou que a porosidade na laminação de planos tomou uma forma tipo elipse, e quanto maior a redução, maior a razão entre a largura e a altura do poro, considerando-se a largura na direção paralela ao eixo dos cilindros;
- 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 de seqüência oval-redondo (laminação de fio-máquina);
- Altas reduções de área nos canais ovais retardaram o fechamento da porosidade central, e os poros nesta condição apresentaram, através de exame na seção transversal das amostras, uma forma semelhante a um hexágono, com paredes laterais planas;
- A maior relação D/h_0 nos canais redondos, na condição de menor redução nos canais ovais, propiciou um maior fechamento do poro, favorecendo uma maior tensão de compressão no centro do material;

- 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;
- Utilizando os melhores níveis das variáveis obtidas através do modelo de regressão para a laminação de fio-máquina (temperatura de 1000°C, redução de área nos canais ovais de 27%, favorecendo uma maior relação D/h_0 nos canais redondos, e velocidade de laminação na cadeira 6 de 0,97 m/s), foi possível fechar a porosidade central, artificialmente criada em tarugo de aço baixo carbono, em uma experiência confirmatória.

7. RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS

A relevância deste trabalho reside principalmente na determinação das melhores condições para o fechamento de uma porosidade central nos dois tipos de laminação: de planos e de fio-máquina. Foi possível comparar as condições de deformação em planos com a deformação em canais e analisar quais os níveis das variáveis testadas influenciam no fechamento da porosidade em cada tipo de laminação.

Com o conhecimento dos melhores níveis de trabalho será possível otimizar as variáveis de acordo com os diferentes aços e bitolas laminadas no laminador 2 da ArcelorMittal Monlevade, visando o fechamento de uma eventual porosidade central proveniente de tarugo, sem prejudicar as demais propriedades do material afetadas pelas variáveis do modelo.

A condição de laminação com menor redução nos canais ovais possibilitará um menor consumo de potência nas cadeiras 3 e 5 do laminador 2 de fio-máquina, além de poder contribuir para uma melhoria da qualidade superficial dos materiais.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Realizar experimentos com aços de classes diferentes para se conhecer o efeito de diferentes aços no fechamento da porosidade central na laminação em canais.

A identificação de porosidade central criada diretamente no lingotamento contínuo e a sua laminação poderia mostrar a influência das variáveis na porosidade real, verificando-se o efeito de gases retidos dentro do poro.

Testar a influência de outras variáveis de laminação como tempo de forno e gradiente de temperatura entre superfície e centro do material na laminação, identificando a influência destas variáveis em conjunto com as já testadas neste trabalho.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. THOME, R., OSTHEIMER, V., NEY, G., RUPPEL, F., GIRGENSOHN, A., PLOCIENNIK, U., SCHMITZ, W., GEERKENS, C., BECKER, M. Soft reduction of continuous cast billets at Saarstahl. *Metallurgical Plant and Technology*, v. 30, n.1, p. 36-42, 2007.
2. RATNAPULI, R.C. Laminação a Quente. Disponível em: <http://www.geocities.com/rcratnapuli/laminacao.html>. Acesso em: 20 de dezembro de 2006.
3. 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.
4. SOARES, R.B., VILELA, A.C.F. Lingotamento Contínuo de Blocos e Tarugos. ABM, São Paulo, 2004, p.92.
5. SIGWORTH, G.K., WANG, C. Mechanisms of porosity formation during solidification: A theoretical analysis. *Metallurgical Transactions B*, v. 24B, p. 349-364, 1993.
6. MUNIENTE, F., TRAVAGLINI, C., COSTANZO, F. Advanced technology for continuous casting of quality and specialty steel blooms. *MPT International*, v. 4, p. 44-48, 2006.
7. PARK, C.Y., YANG, D.Y. A study of void crushing in large forgings II: Estimation of bonding efficiency by finite-element analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, n. 72, p. 32-41, 1997.
8. TREMAINE, A. Characterization of internal defects in open die forgings. Colorado School of Mines, EUA, novembro de 2005.
9. SIGL, K.M., HARDIN, R.A., STEPHENS, R.I., BECKERMANN, C. Fatigue of 8630 cast steel in the presence of porosity. *International Journal of Cast Metals Research*, v. 17, n. 3, p. 130-146, 2004.
10. PARK, C.Y., YANG, D.Y. Modelling of void crushing for large-ingot hot forging. *Journal of Materials Processing Technology*, n. 67, p. 195-300, 1997.

11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. WALLERO, A. Closing of a central longitudinal pore in hot rolling. *Journal of Mechanical Working Technology*, n. 12, p. 233-242, 1985.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. FILIPOVIC, M. *Evolution of artificial defects during shape rolling*. Estocolmo: Royal Institute of Technology, 2007. 31p. (Dissertação de Mestrado, Metalurgia Mecânica).
19. NAKASAKI, M., TAKASU, I., UTSUNOMIYA, H. Application of hydrostatic integration parameter for free-forging and rolling. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 177, p. 521-524, 2006.
20. CHEN, D.C. Rigid-plastic finite element analysis of plastic deformation of porous metal sheets containing internal void defects. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 180, p. 193-200, 2006.
21. 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.

22. KIUCHI, M., HSIANG, S.H. The influence of temperature distribution in thickness direction on porosity-closing behaviours and the investigation into closing behaviours of three-dimensional porosity – study on application of limit analysis to rolling process. *Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity*, v. 22, p. 1215-1222, 1981.
23. CHAIJARUWANICH, A., DASHWOOD, R.J., LEE, P.D., NAGAUMI, H. Pore evolution in a direct chill cast Al-6 wt.% Mg alloy during hot rolling. *Acta Materialia*, v. 54, p. 5185-5194, 2006.
24. NAKAO, H., YAMABA, R., AOKI, I., KAWAI, T., MABUCHI, H., TAKAISHI, S. Rolling and heat treatments of heavy section low alloy steel plates. *Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity*, n. 62, p. 1708-1718, 1976.
25. KIUCHI, M., HSIANG, S.H. Two-dimensional analysis of closing behaviours of internal porosity – study on application of limit analysis to rolling process. *Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity*, v. 22, p. 927-934, 1981.
26. IMAMURA, H., TOMONAGA, M., TOMINAGA, M., SAITO, S., TSUDA, O. Effect of slab inner temperature distributions on improving loose structure by new slabbing method. In: 100th ISIJ Meeting, October 1980, Lecture n. S989.
27. TSUDA, O., MIZUTA, A., YAMAGUCHI, Y., OSUNA, H., YUGAKI, H. A rolling method with partially cooling of slabs. In: 101st ISIJ Meeting, April 1981, Lecture n. S369.
28. ISHINE, Y. Development of control rolling process for suppressing grain coarsening of rod and bar. *ISIJ*, v. 11, 1998, p. 276-286.
29. SMITH, G.V. Properties of metals at elevated temperatures. McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, 1950, p.88.
30. BELEM, A.C.V., PEREIRA, A.M.T., DARÉ, C.T., CARRANZA, C., DAMASCENO, E.C., ALVES, J.E., DINIZ, L.C.O., RODRIGUES, M.D.F., ANDRADE, P.B.S., LOPES, V.K. Introdução ao Planejamento de Experimentos. In: Programa Seis Sigma Black Belts, FDG, Belo Horizonte, 2003, p. 184-219.
31. TANAKA, M., ONO, S., TSUNENO, M. Factors contributing to crushing of voids during forging. *Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity*, v. 27, p. 852-859, 1986.

32. 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.
33. TANAKA, M., ONO, S., TSUNENO, M. A numerical analysis on void crushing during side compression of round bar by flat dies. *Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity*, v. 28, p. 238-244, 1987.
34. CODA, R.C. Laminação: Processo, Calibração e Defeitos. Copar Engenharia, Porto Alegre, Brasil, 2004.
35. LEVINE, D.M., STEPHAN, D., KREHBIEL, T.C., BERENSON, M.L. *Estatística – Teoria e Aplicações Usando o Microsoft® Excel em Português*. 3ª Edição. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2005. p.471-602.