

Universidade de São Paulo  
PECE – Programa de Educação Continuada

Bartolomeu Rabello Dalbonne

**ESTUDO DA REGIÃO DE MISTURA DE AÇO  
NO LINGOTAMENTO CONTÍNUO**

ESP/SO  
2008  
D15e

São Paulo  
2008

Bartolomeu Rabello Dalbonne

**ESTUDO DA REGIÃO DE MISTURA DE AÇO  
NO LINGOTAMENTO CONTÍNUO**

Monografia apresentada ao Programa de Educação  
Continuada da Escola Politécnica da Universidade  
de São Paulo, para a conclusão de MBA em  
Siderurgia.

Área de Concentração: Metalurgia

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Aquino Martorano

São Paulo  
2008

DEDALUS - Acervo - EPMT



31800007511

MBA/Si 2008

D 15 e

M 2008 M

FICHA CATALOGRÁFICA

Dalbonne, Bartolomeu Rabello

Estudo da região de mistura de aço no lingotamento contínuo / B. R. Dalbonne. -- São Paulo, 2008.

55 p.

Monografia (MBA em Siderurgia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1. Lingotamento 2. Aço 3. Modelagem matemática I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Programa de Educação Continuada em Engenharia II.t.

1826678

### **DEDICATÓRIA**

À minha esposa Adriana Carvalho Meneses Dalbonne, que com muito amor, carinho e compreensão demonstrou apoio incondicional ao longo do período de realização deste trabalho, transmitindo paz e harmonia, principalmente nos momentos mais difíceis.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por me conceder saúde e disposição para vencer mais este desafio;

Ao Superintendente da Aciaria da Cosipa, Eng<sup>o</sup> Antonio Márcio de Carvalho Junqueira e ao Gerente de Suporte Técnico da Aciaria da Cosipa, Eng<sup>o</sup> Danilo Di Napoli Guzela, por todo apoio demonstrado durante os dois anos de MBA;

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelo de Aquino Martorano, pela dedicação, atenção e empenho, que com sua experiência e conhecimento, transmitiu sempre as orientações necessárias para que o trabalho tivesse êxito;

Ao Prof. Dr. Marcelo Breda Mourão, pela eficiente coordenação do curso;

Aos bibliotecários da EPUSP, Gilberto Martins pelo sempre pronto atendimento e orientações nas consultas; e da Cosipa, Vanessa Pereira, pela presteza e rapidez na obtenção das informações, livros e artigos requeridos;

Aos colegas da Gerência de Suporte Técnico da Aciaria da Cosipa, da Gerência de Condicionamento de Placas, Centro de Testes e Laboratório pelo companheirismo, positivismo e a sempre pronta disponibilidade em contribuir quando solicitados;

Aos meus queridos pais, Algemiro e Cilda, por ter priorizado sempre na vida de seus filhos, os estudos e o trabalho como a forma mais sólida para um futuro bem sucedido.

## RESUMO

Quando comparado com outros processos de solidificação do aço, o lingotamento contínuo apresenta índices muito importantes em termos de produtividade e custo, os quais se tornam cada vez melhores quanto maiores forem os seqüenciais de lingotamento. Com a crescente demanda cada vez mais exigente por qualidade, quantidades diversas de faixas de composição química, pedidos de menores tonelagens e prazos de entrega cada vez mais estreitos, os longos seqüenciais de lingotamento tornam bastante freqüente a ocorrência de lingotamentos consecutivos de aços de qualidades diferentes gerando as placas de mistura. Estas placas de mistura são desviadas dos clientes originais e vendidas a um preço inferior ao praticado para placas normais ou até mesmo utilizadas como carga sólida para uma nova corrida no conversor.

Foi feita uma revisão bibliográfica com o objetivo de se conhecer melhor as variáveis influentes na extensão da placa de mistura e os mecanismos mais utilizados para a redução da mesma.

## **ABSTRACT**

When compared with other steel solidification processes, the continuous casting shows very important indexes in terms of productivity and cost, which become increasingly high the larger the sequence. With the growing demand for quality, different chemical compositions, requests for smaller tonnage and short timing of delivery, the long casting sequence make quite frequent the occurrence of different consecutive steel qualities. When a ladle containing steel with a different composition opens, slabs with mixed composition are created. These slabs are sold at prices below that for the normal practice for slabs or are even used as load for a new heat in the converter.

A literature review was made with the aim of understanding the important variables that affect the length of the mixing slab and to become aware of the mechanisms that can be used to reduce this length.

## SUMÁRIO

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 ) INTRODUÇÃO.....                                                          | 11 |
| 2) OBJETIVO .....                                                            | 13 |
| 3) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....                                                | 13 |
| 3.1) PROCESSO DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO.....                                  | 13 |
| 3.1.1) UM BREVE HISTÓRICO.....                                               | 13 |
| 3.1.2) DESCRIÇÃO GERAL DO PROCESSO .....                                     | 15 |
| 3.1.3) CONCEITO GERAL DE MISTURA NO LINGOTAMENTO CONTÍNUO .                  | 19 |
| 3.2) ESCOAMENTO DO AÇO LÍQUIDO NO LINGOTAMENTO CONTÍNUO .....                | 21 |
| 3.2.1) VISÃO GERAL DE REATORES NO LINGOTAMENTO CONTÍNUO.....                 | 21 |
| 3.2.2) ESCOAMENTO DO AÇO LÍQUIDO NO DISTRIBUIDOR.....                        | 23 |
| 3.2.3) ESCOAMENTO DO AÇO LÍQUIDO NO MOLDE .....                              | 27 |
| 3.3) ANÁLISE DO PROCESSO DE MISTURA ATRAVÉS DA MODELAGEM<br>MATEMÁTICA ..... | 28 |
| 4.0) ANÁLISE DE UMA PLACA DE MISTURA DA COSIPA.....                          | 50 |
| 5.0) CONCLUSÕES.....                                                         | 54 |
| 6.0) REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....                                         | 55 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.1 Comparação entre os fluxos de produção de aço com lingotamento convencional e contínuo. [Faco, 2007]                                                                                                                            | 14 |
| Figura 3.2 – Vista lateral dos principais componentes de uma máquina de lingotamento contínuo. [Valadares, 2005]                                                                                                                           | 16 |
| Figura 3.3 – Região do molde e início do resfriamento secundário. Efeito do abaulamento do veio provocado pela pressão ferrostática. [Rizzo, 2006]                                                                                         | 18 |
| Figura 3.4 – Distribuição típica de água no resfriamento secundário. [Valadares, 2005]                                                                                                                                                     | 18 |
| Figura 3.5 – Visão geral do tipo de mistura: (a) compatível; (b) incompatível. [Faco, 2007]                                                                                                                                                | 20 |
| Figura 3.6 – Visão geral do escoamento do aço líquido panela, distribuidor e molde. [Huang e Thomas, 1996]                                                                                                                                 | 23 |
| Figura 3.7 Esquema simplificado do escoamento do aço líquido no distribuidor e molde. [Oliveira, 2003]                                                                                                                                     | 28 |
| Figura 3.8 – Comparação do comprimento da região de mistura para diferentes direções de faixa de especificação, diferentes níveis de aço no distribuidor e diferentes larguras da placa fria. [Burns, 1992]                                | 30 |
| Figura 3.9 – Concentração adimensional do Carbono em função da distância lingotada, durante uma transição de qualidade. A linha é o resultado do modelo e os símbolos das medições. [Mostert e Van der Bogert, 1998]                       | 32 |
| Figura 3.10 - Perfil de concentração de saída para condições isotérmicas e não-isotérmicas para o distribuidor sem mecanismos de controle de fluxo, em estado estacionário com uma vazão de 2,84t/min. [Damle e Sahai, 1995]               | 34 |
| Figura 3.11 – Concentração de saída para o distribuidor (sem mecanismo de controle e condições isotérmicas) com três níveis de aço no distribuidor. Estado estacionário a 2,8t/min. Nível de operação normal a 1,2m. [Damle e Sahai, 1995] | 35 |
| Figura 3.12 – Concentração de saída para o distribuidor (sem mecanismo de controle e condições isotérmicas) com quatro diferentes estratégias de enchimento do distribuidor. Estado estacionário a 2,8t/min. [Damle e Sahai, 1995]         | 36 |
| Figura 3.13 – Comparação entre a quantidade prevista de mistura obtida por diferentes estratégias de enchimento do distribuidor. [Damle e Sahai, 1995]                                                                                     | 37 |
| Figura 3.14 – Concentração de saída mostrando o tempo de transição de especificação mais estreita para mais larga. [Damle e Sahai, 1995]                                                                                                   | 38 |
| Figura 3.15 – Concentração de saída mostrando o tempo de transição de especificação mais larga para mais estreita. [Damle e Sahai, 1995]                                                                                                   | 38 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.16 – Variação típica de velocidade de lingotamento, peso de aço no distribuidor e vazões de entrada e saída no distribuidor durante uma troca de panela. A abertura da nova panela ocorreu em $t = 0$ ; quando $t < 0$ , tem-se os eventos que ocorrem antes desta abertura. [Huang e Thomas, 1996] | 40 |
| Figura 3.17 – Esquema de um distribuidor de lingotamento contínuo e suas seis frações de volume. [Huang e Thomas, 1996]                                                                                                                                                                                      | 44 |
| Figura 3.18 – Comparação entre concentração adimensional prevista pelo submodelo de mistura no distribuidor e os resultados obtidos em modelo físico de água no centro de pesquisas da Armco. [Huang e Thomas, 1996]                                                                                         | 45 |
| Figura 3.19 – Representação esquemática das três zonas do Submodelo de mistura no veio. [Huang e Thomas, 1996]                                                                                                                                                                                               | 46 |
| Figura 3.20 – Comparação entre concentração adimensional prevista pelo submodelo de mistura no veio 1D com o modelo 3D. [Huang e Thomas, 1996]                                                                                                                                                               | 48 |
| Figura 3.21 – Comparação da composição prevista da placa com medições realizadas na Armco Works para uma troca de panela padrão. [Huang e Thomas, 1996]                                                                                                                                                      | 49 |
| Figura 4.1 – Desenho esquemático mostrando posição para retirada de amostras. Após retirados os tarugos, espaçados entre 0,5 a 1,0m, na linha central e de superfície da placa, as amostras foram retiradas a $\frac{1}{4}$ da espessura da placa....                                                        | 51 |
| Figura 4.2 – Composição adimensional do “Mn” em função da distância (posição da amostra na placa, conforme figura 4.1).....                                                                                                                                                                                  | 52 |
| Figura 4.3 – Concentração adimensional de “V” em função da distância (posição da amostra na placa, conforme figura 4.1).....                                                                                                                                                                                 | 52 |

## 1 ) INTRODUÇÃO

Com o mercado globalizado, o aumento da produção mundial de aço vem sendo acompanhado por uma demanda cada vez mais exigente por qualidade que, entre outras, inclui diversas faixas de composição química e prazos de entrega cada vez mais estreitos. Para satisfazer esta demanda o processo mais largamente utilizado nas usinas siderúrgicas é o lingotamento contínuo, pois consegue aliar produtividade e custos reduzidos.

Para se manter competitiva no mercado, a Cosipa passou a produzir placas exclusivamente pelo processo de lingotamento contínuo a partir de 1999 e vem modernizando suas instalações e adquirindo novas tecnologias. Atualmente a Aciaria da Cosipa conta com:

- Três conversores LD de 160t (um com sopro-combinado e os outros dois em fase de aquisição desta tecnologia).
- Cinco equipamentos de refino secundário (FoPa - Forno Panela, AHF- Aluminium Heating Facilities, RH-T/COB - Desgaseificador à Vácuo Tcnometal Combined Oxygen Blowing e duas EBAs - Estações de Borbulhamento de Argônio).
- Quatro máquinas de lingotamento contínuo de placas, (três de um veio (210 ou 260 x 1020 a 1900mm) e uma de dois veios (210 ou 260 x 750 a 1900mm). A máquina de dois veios é de última geração com vários recursos tecnológicos e as outras de um veio, são mais antigas e estão com planos de modernização em andamento sendo que uma delas já se encontra em processo de obras com partida prevista para Abril/2008.

A máquina de lingotamento contínuo precisa trabalhar com seqüenciais longos, envolvendo o mínimo possível de trocas de distribuidor para conseguir aliar alta produtividade e custos reduzidos. Logo, são bastante freqüentes lingotamentos consecutivos de aços de composição química diferentes, gerando placas com composições químicas intermediárias indesejadas. Conforme Costa, 2003, estas placas são chamadas de “placas de mistura”, que são vendidas para aplicações sem exigência, a um preço inferior ao praticado para placas normais.

Na Cosipa a geração de placas de mistura está na ordem de 3,0% da produção, o que corresponde a algo em torno de 11000 ton/mês. A exigência do mercado tem tornado a geração de placas de mistura um problema que exige cada vez mais atenção. Para minimizar os custos associados a estas placas, o operador da máquina de lingotamento contínuo precisa conhecer exatamente onde está a região de mistura a fim de desclassificar/degradar somente a quantidade estritamente necessária. [Huang e Thomas, 1996]

Na Cosipa, a determinação da região de mistura nas máquinas de lingotamento contínuo de um veio é unicamente empírica. Na máquina de dois veios, que é mais moderna, utiliza-se um modelo matemático (Intermix calculator) do fabricante do equipamento (Voest-Alpine), visando a otimização on-line do corte das placas de mistura.

## **2) OBJETIVO**

O presente trabalho visa elaborar uma revisão bibliográfica para aprimorar o conhecimento da Cosipa sobre: (1) a geração de placas de mistura; (2) as variáveis operacionais que afetam o comprimento das placas de mistura e (3) os mecanismos possíveis para a redução do comprimento das placas de mistura.

## **3) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **3.1) Processo de Lingotamento Contínuo**

#### **3.1.1) Um breve histórico**

Antes do desenvolvimento do lingotamento contínuo, a solidificação do aço líquido se dava pelo vazamento deste em moldes metálicos chamados lingoteiras onde era resfriado até a sua completa solidificação. O aço sólido assim obtido era designado por lingote de aço e o processo de obtenção chamado de lingotamento convencional. O lingote, após resfriado, era estripado da lingoteira por pontes rolantes especiais, reaquescido nos chamados fornos-poço e finalmente laminado na forma de placas, tarugos ou perfis, como mostra a Figura 3.1.

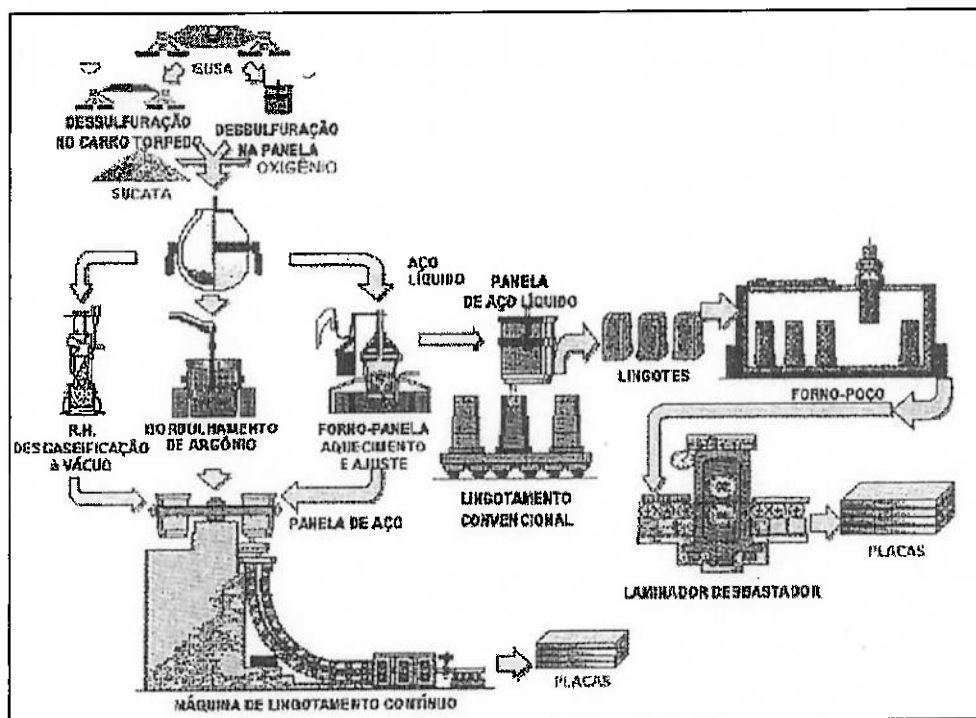


Figura 3.1 Comparação entre os fluxos de produção de aço com lingotamento convencional e contínuo. [Faco, 2007]

O lingotamento contínuo surgiu na metade do século XIX, idealizado por G. E. Sellers (1840), J. Laing (1843) e Henry Bessemer (1846) somente para metais não-ferrosos com baixo ponto de fusão, devido às limitações de engenharia da época. Mesmo assim, Henry Bessemer patenteou em 1846 o primeiro trabalho sobre o processo de lingotamento contínuo de folhas de aço, com concepção muito semelhante à que hoje se tem tentado para realizar o lingotamento contínuo de tiras com rolos duplos [Valadares, 2005]. Segundo esta concepção, placas, tarugos e blocos são produzidos continuamente, eliminando-se algumas etapas de processo em comparação ao lingotamento convencional, como mostra a Figura 3.1, onde as etapas de laminação foram eliminadas.

Em 1887, na Alemanha, R.M. Daelen propôs um projeto básico correspondente às atuais e modernas máquinas de lingotamento contínuo, com molde refrigerado a água, aberto nas partes superior e inferior e alimentado por um

jato de metal líquido, uma zona de refrigeração secundária, barra falsa, rolos extratores e mecanismos para o corte do produto [Valadares, 2005].

Em 1933, Siegfried Junghans desenvolveu e patenteou o sistema de oscilação do molde, que resolveu vários problemas causados pela aderência da pele solidificada do aço no molde, dando início a uma larga aplicação industrial do lingotamento contínuo [Valadares, 2005].

No Brasil, o processo de lingotamento contínuo foi introduzido pela Riograndense em 1960 através da implantação de uma máquina de tarugos de dois veios, seguida pela siderúrgica Dedini, em 1968, com uma máquina de tarugos de três veios [Valadares, 2005]. A partir de 1972 ocorreu um crescimento de forma bastante acentuada no número de máquinas para lingotamento de tarugos no país. Em 1976, na Usiminas, foram instaladas as duas primeiras máquinas do Brasil de lingotamento contínuo de placas com dois veios cada, seguida pela CSN, Acesita, Cosipa e CST. Até meados de 2004, havia no Brasil, 15 máquinas de lingotamento Contínuo de placas em operação com 24 veios e 23 máquinas de lingotamento contínuo de tarugos/blocos com cerca de 70 veios [Valadares, 2005].

### **3.1.2) Descrição geral do processo**

O lingotamento Contínuo consiste em receber a panela de aço tratado química e termicamente na torre giratória, mostrada na figura 3.2, para início de lingotamento. Na preparação da máquina para iniciar o lingotamento, uma placa falsa, chamada de barra-falsa, impulsionada pelos rolos extratores é inserida no veio pela parte inferior ou superior, dependendo do tipo de instalação.

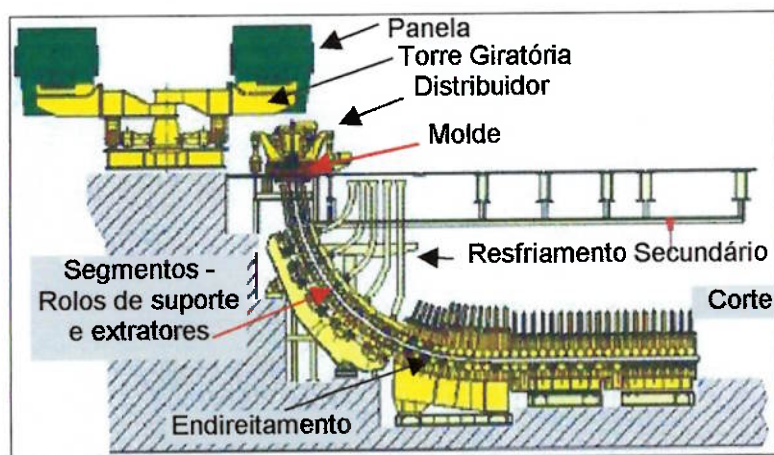


Figura 3.2 – Vista lateral dos principais componentes de uma máquina de lingotamento contínuo. [Valadares, 2005]

Ao atingir a posição adequada do molde, a cabeça da barra falsa é mantida fixa pelos rolos extratores que a pressionam. Neste momento é iniciada a selagem que consiste na eliminação de todas as folgas existentes, por meio de materiais à base de papelão, molas e limalhas, formando o “fundo” do molde e preparando-o para receber o aço líquido proveniente do distribuidor.

Para iniciar o vazamento de metal líquido, a preparação da máquina deve estar concluída: o molde selado; distribuidores e insumos refratários, como a válvula longa e submersa, aquecidos; insumos, como o pó-fluxante, o sistema de argônio, e os redutores de “*splash*”, disponíveis. Em seguida, abre-se a válvula gaveta da panela deixando que o aço líquido vaze, por meio da válvula longa, para o distribuidor, que tem por finalidade principal regular o fluxo de aço líquido para um ou mais moldes, dependendo do tipo de instalação. A válvula do distribuidor (tampão), por sua vez, é aberta quando o metal atinge uma altura pré-determinada iniciando o enchimento do molde, por meio da válvula submersa. O aço rapidamente solidifica ao contato com a barra falsa que é então extraída, a uma taxa crescente, até atingir-se um estado estacionário de velocidade, definido em função da produtividade e da qualidade requeridas [Valadares, 2005].

O molde, que são placas de cobre eletrolítico refrigeradas a água, é também chamado de região de resfriamento primário, pois a água de refrigeração não entra em contato direto com o aço líquido. Quando o aço é vazado do distribuidor e entra em contato com a selagem e as paredes do molde imediatamente se inicia o processo de solidificação. A camada solidificada até a saída do molde deve ser suficientemente espessa para suportar a pressão ferrostática do líquido e as solicitações mecânicas externas. Esta espessura apresenta, ao sair do molde, cerca de 15 a 25 mm dependendo da velocidade de lingotamento, temperatura de alimentação do aço e vazão de água no molde. Durante todo o processo o molde está sujeito a um movimento de oscilação vertical que causa o fechamento de possíveis trincas originadas no interior da casca solidificada [Valadares, 2005].

Logo que deixa o molde, o veio é guiado por rolos para uma região de resfriamento por contato direto com a água de uma bateria de chuveiros (*"sprays"*) e por radiação térmica emitida para o ambiente. Esta região é denominada de resfriamento secundário. O resfriamento por chuveiros deve ser controlado para manter a temperatura na superfície da casca solidificada aproximadamente constante. A região de resfriamento secundário é dividida em diversas zonas para facilitar o controle da extração de calor.

Logo abaixo do molde, uma vez que a espessura do sólido ainda é muito pequena, existe a tendência de abaulamento devido à pressão ferrostática, como mostrado esquematicamente na figura 3.3. É necessária a utilização de uma maior vazão de água (zona 1) e de rolos de pequeno diâmetro, bastante próximos uns dos outros. Esta zona é de vital importância para o sucesso da operação. No caso do lingotamento contínuo de placas, o controle do resfriamento secundário é

normalmente feito dividindo-se a primeira zona em sub-zonas independentes. Normalmente a refrigeração das faces estreitas é feita somente na zona 1.

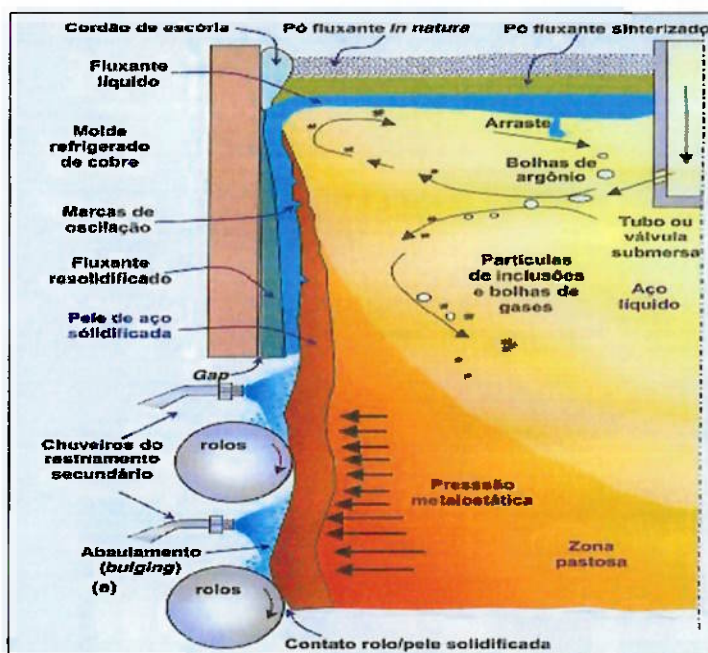


Figura 3.3 – Região do molde e início do resfriamento secundário. Efeito do abaulamento do veio provocado pela pressão ferrostática. [Rizzo, 2006]

Nas demais zonas são posicionadas câmeras de chuveiros projetadas sempre com o objetivo de manter constante a temperatura na superfície da casca solidificada. À medida que o veio caminha no resfriamento secundário, o gradual aumento da espessura solidificada aumenta a resistência ao fluxo de calor do metal líquido para o ambiente, diminuindo-se gradativamente a temperatura da superfície. Logo, a vazão de água dos chuveiros deve ser reduzida para manter a temperatura na superfície constante, como mostra a figura 3.4. [Valadares, 2005], (Garcia, A. 2006)

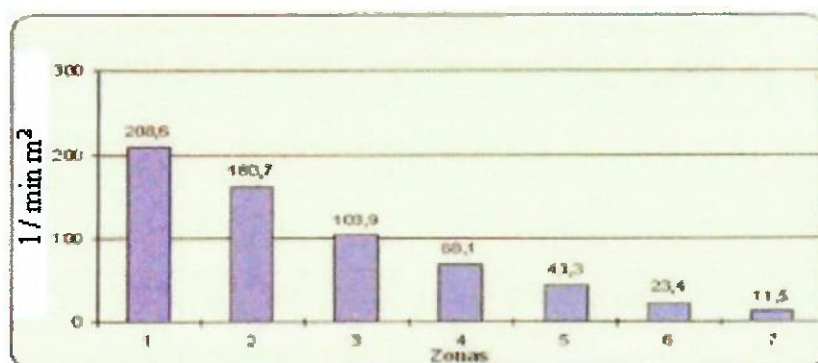


Figura 3.4 – Distribuição típica de água no resfriamento secundário. [Valadares, 2005]

No caso de máquinas curvas o veio deve ser retificado, operação que é efetuada geralmente por um ou mais pares de rolos em função da filosofia de projeto do equipamento.

Um mecanismo de corte que permite o seccionamento do veio durante o lingotamento é incorporado ao processo de modo que o lingotamento contínuo converta aço líquido diretamente em produto semi-acabado com o comprimento requerido para posteriores transformações. [Valadares, 2005]

### **3.1.3) Conceito geral de mistura no Lingotamento Contínuo**

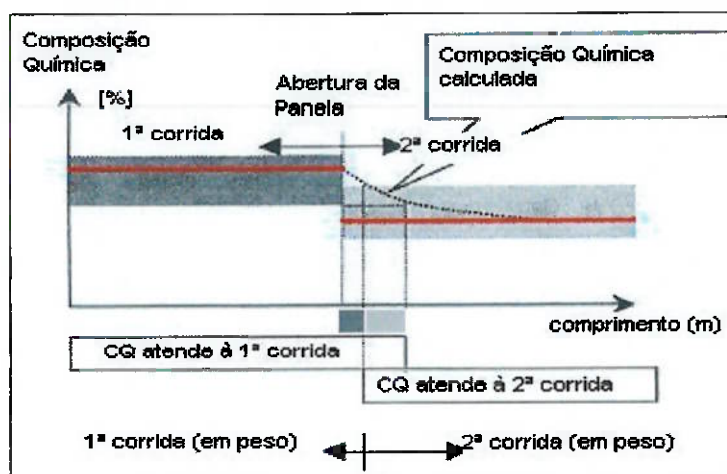
Conforme Faco, 2007, um dos parâmetros que definem as propriedades mecânicas do aço é a sua composição química, ou seja, a quantidade de carbono, manganês, alumínio, nióbio, vanádio, entre outros, presentes no aço. Estas propriedades mecânicas devem propiciar diversas características específicas para atender às aplicações, que vão desde tubos para gasodutos, chapas para a indústria naval e automobilística até aplicações menos nobres, como, chapas para fabricação de piso.

O lingotamento contínuo produz toda essa gama de aço de maneira seriada e, como tal, um dos problemas que surgem é a produção de placas cuja composição química varia ao longo do seu comprimento. Estas placas, definidas anteriormente como placas de mistura ou de transição, apresentam propriedades mecânicas heterogêneas ao longo de seu comprimento. Como mostram as figuras 3.5a e 3.5b, há duas situações possíveis para as placas de mistura:

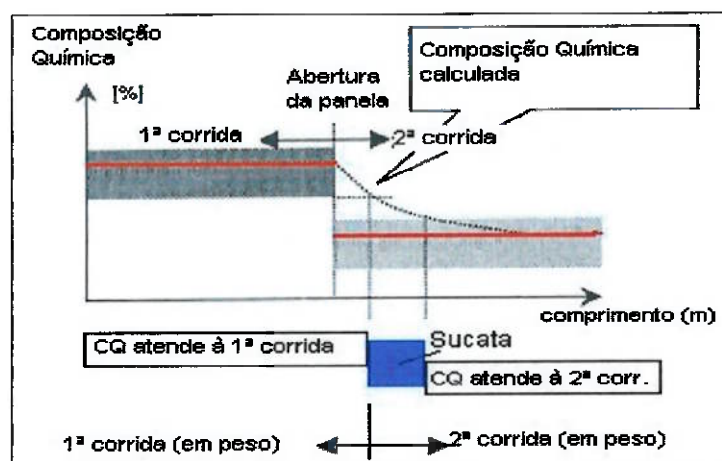
- a) Placa de mistura ou de transição compatível: os constituintes químicos presentes na composição das corridas lingotadas estão contidos entre os

limites superior e inferior da faixa especificada. Neste caso, as placas de aços compatíveis podem ser aproveitadas.

- b) Placa de mistura ou de transição incompatível: os constituintes químicos presentes na composição das corridas lingotadas não estão contidos entre os limites superior e inferior da faixa especificada; Neste caso, as placas de mistura ou são sucata, retornando ao processo como parte da carga sólida que comporá a formação de outra corrida no conversor ou são vendidas como placas de aço sem atender exigências de propriedades mecânicas e composição química.



(a)



(b)

Figura 3.5 – Visão geral do tipo de mistura: (a) compatível; (b) incompatível. [Faco, 2007]

### 3.2) Escoamento do Aço Líquido no Lingotamento Contínuo

Atualmente está bem conhecido que são três os parâmetros importantes para caracterização do aço em qualquer etapa da seqüência do processamento: a *temperatura*, a *composição química* e, conforme referenciado por Andrade (1988 apud Costa, 2003), o *padrão de escoamento do aço*. A temperatura e a composição química influenciam significativamente na físico-química do processo de fabricação do aço. O padrão de escoamento tem relação direta com perdas térmicas, reoxidação do aço, flotação de inclusões e formação da mistura de aços. Desta forma, os próximos itens discutem aspectos relacionados ao escoamento do aço líquido nas etapas do processo de lingotamento contínuo.

#### 3.2.1) Visão Geral de Reatores no Lingotamento Contínuo

Como esclarece Barbosa, 2002, no lingotamento contínuo são utilizados três reatores metalúrgicos: a *panela de aço*, o *distribuidor* e o *molde*.

A *panela*, ilustrada na figura 3.6, tem a função de receber o aço do conversor, servir como meio de transporte do aço líquido até o refino secundário, (onde são realizados os ajustes finos de composição química e temperatura) e em seguida transportá-lo até a torre da máquina de lingotamento contínuo onde servirá como reservatório de aço líquido durante o lingotamento.

O *distribuidor*, ilustrado na figura 3.6, recebe o aço líquido da *panela* durante o lingotamento e, como reservatório, permite a continuidade do processo principalmente nas trocas de *panela*. Além disso, permite a flotação de inclusões não metálicas, o controle do superaquecimento e a homogeneização química e térmica do aço.

O molde, apresentado na figura 3.6, finalmente, irá receber o aço líquido do distribuidor e fazer a extração de calor necessária para dar início ao processo de solidificação do metal.

No distribuidor o fenômeno da mistura tem início no momento da abertura da nova panela quando o aço novo (corrida posterior) é vazado sobre o aço remanescente (corrida anterior). No molde a mistura começa quando este aço misturado sai do distribuidor e entra no molde sobre o aço remanescente como mostra a figura 3.6.

É importante observar que o distribuidor é um equipamento com revestimento refratário cuja vida é limitada, desta forma, durante um seqüencial de lingotamento vários distribuidores são usados. A substituição de um distribuidor com revestimento em final de vida por um outro com revestimento novo é feita no momento da troca de panela, assim, com relação à mistura no momento da troca de panela há duas situações: a) Com troca de distribuidor e b) Sem troca de distribuidor. No primeiro caso, o vazamento do aço da nova panela encontra um distribuidor vazio, o que garante que a mistura ocorra somente no veio. No segundo caso, o aço proveniente da nova panela, irá misturar com o aço remanescente da panela anterior, o que irá promover uma mistura de aço no distribuidor além daquela que ocorre no veio conforme mencionado acima.

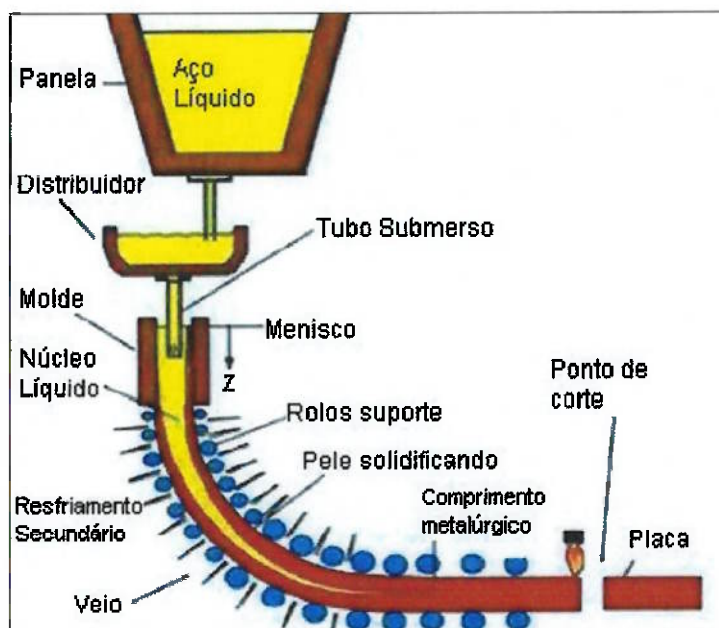


Figura 3.6 – Visão geral do escoamento do aço líquido: panela, distribuidor e molde.  
[Huang e Thomas, 1996]

### 3.2.2) Escoamento do Aço Líquido no distribuidor

Um bom conhecimento das características do escoamento no distribuidor contribui grandemente para ações voltadas à minimização do volume de aço misturado durante uma troca de composição no lingotamento contínuo. O distribuidor, em sua concepção original era apenas um reservatório de aço que permitiria a continuidade do processo nas trocas de panela. Atualmente sabemos que ele muito contribui para o controle da qualidade do aço através da flotação de inclusões, controle da temperatura, entre outras. Sahai (1990 apud Barbosa, 2002) ressalta que os distribuidores do processo de lingotamento contínuo devem apresentar necessariamente algumas funções operacionais, tais como:

- Distribuição do fluxo de aço líquido entre os veios de cada molde;
- Separação de inclusões não-metálicas do aço líquido para a escória de topo no distribuidor, visando um melhor controle do grau de desoxidação ou da limpidez do produto final;

- Controle da temperatura e velocidade de lingotamento contínuo;
- Atuarem como reservatório de aço líquido durante o período transiente (período de troca de painéis);
- Melhorar a eficiência das adições de ligas no aço líquido durante o vazamento do metal da panela para o distribuidor;
- Controle da composição de gás dissolvido no metal e aquecimento, por exemplo, por plasma a arco.

Segundo (Szekely e Ilegbusi (1988), Schade et al.(1996) e Mclean (1990), Apud Barbosa, 2002) um distribuidor do processo de lingotamento contínuo caracteriza-se pela existência de três zonas de fluxo distintas, como:

- a) Zona de fluxo pistonado: É a porção do aço líquido que atravessa o distribuidor com velocidade praticamente uniforme e sem ocorrer mistura na direção do escoamento [Rizzo, 2006] este tipo de escoamento é ideal para a flotação das inclusões não-metálicas.
- b) Zona de mistura perfeita: é a fração do volume que contribui para a eliminação dos gradientes de temperatura e de composição química no metal líquido. Esta região é caracterizada por gradientes de velocidade e níveis de turbulência relativamente elevados, promovendo o arraste de partes da escória para dentro do aço líquido, distúrbios na flotação das inclusões não-metálicas e aumento da taxa de reoxidação do metal líquido.
- c) Zona de volume morto: É a fração do volume total do distribuidor que possui velocidade tão baixa que pode ser considerada estagnada. Esta zona é indesejada, pois reduz efetivamente o volume útil do reator, além de provocar a perda de temperatura do banho e a segregação de elementos químicos.

Uma quarta zona denominada de zona de curto-circuito é descrita por (Heard, 1992 e Sing e Koria, 1996, apud Barbosa, 2002), como sendo a zona representada pela porção do fluido que entra no distribuidor, movimenta-se pelo fundo do reator e sai em um curto intervalo de tempo, sem permitir que as inclusões existentes nesta porção do líquido tenham chances de flotar até a superfície. Portanto esta zona deve ser eliminada, uma vez que reduz o tempo mínimo de residência do aço líquido no distribuidor, resultando na transferência das inclusões do distribuidor para o molde. Esta zona pode ser eliminada com o uso de modificadores de fluxo no distribuidor.

A definição destas quatro zonas descritas acima é de fundamental importância para o entendimento dos fenômenos que envolvem a flotação de inclusões bem como para a geração de mistura de aço no distribuidor. Devido à complexidade operacional que envolve um distribuidor em trabalho, e aos elevados custos, a melhoria nos projetos destes equipamentos é baseada em modelos físicos e matemáticos.

Conforme (Ahuja e Sahai, 1986, Costa Neto, 1997; Andrade et al, 1993; Silva, 1992; Singh & Koria, 1996; apud Valadares, 2005) um distribuidor deve satisfazer os seguintes requisitos:

- Mínima faixa de variação do tempo de residência com média maximizada, para favorecer a separação das inclusões não-metálicas do aço líquido;
- Volume morto mínimo, para maximizar o volume útil, minimizar a segregação e perda térmica com formação de cascão;
- Volume de curto-circuito mínimo, para reduzir a ocorrência de vórtice e o arraste das inclusões não-metálicas do distribuidor para o molde;

- Volume de mistura perfeita máximo, para favorecer a coalescência das inclusões não-metálicas menores; e conforme Sinha e Sahai, 1993, este volume de mistura perfeita máximo deve ser contido na região de entrada do jato de aço;
- Volume pistonado máximo, para favorecer a flotação das inclusões não-metálicas e sua absorção pela camada de escória no distribuidor.

Esses requisitos objetivam a qualidade interna da placa produzida, ou seja, promover a flotação de inclusões e redução do arraste de escória para o molde, os quais podem ser conflitantes com a redução da extensão da região de mistura.

Chakraborty e colaboradores, 1999, por meio de modelagem física de processo, avaliaram o efeito do projeto dos distribuidores, dos dispositivos modificadores de fluxo e dos padrões de enchimento do distribuidor sobre o fenômeno de mistura de aços no distribuidor e as principais conclusões obtidas nesse estudo foram:

- São conflitantes os objetivos de reduzir a extensão da região de mistura de diferentes qualidades de aço com a simultânea manutenção de sua limpidez; (remoção de inclusões);
- A prática de drenagem do distribuidor deixando o nível fixo e baixo por algum tempo após abertura da nova qualidade, embora efetiva na redução da tonelagem de mistura, resulta em alto teor de inclusão no aço, porque facilita a incorporação da camada de escória;
- A solução mais efetiva para a redução da mistura de qualidades foi a alteração do projeto do distribuidor por meio da elevação da sua base,

- A diminuição do volume útil do distribuidor, associada à elevação da sua base, resultou numa redução do tempo de residência, contudo, esta redução foi recuperada por uma apropriada modificação nos controladores de fluxo, tais como barragens e diques, sem simultaneamente aumentar a extensão da mistura de qualidade no distribuidor.

### **3.2.3) Escoamento do Aço Líquido no molde**

O conhecimento das características do escoamento no Molde também é importante para definir ações voltadas à minimização do volume de aço misturado durante uma troca no lingotamento contínuo. Conforme Costa, 2003, o escoamento do aço líquido no molde é determinado principalmente pela configuração da válvula submersa, dimensões do produto lingotado e velocidade de lingotamento. Com relação à mistura, a principal característica é a profundidade de penetração de aço líquido no interior do veio. A primeira função da válvula submersa é proteger o jato de aço da atmosfera, evitando sua reoxidação. Como outras funções podemos citar a manutenção de um jato estável e com menor turbulência no topo do molde, favorecendo a flotação de inclusões e garantindo que não haja arraste de pó fluxante para o interior do veio. A figura 3.7 mostra uma visão esquemática simplificada deste escoamento.

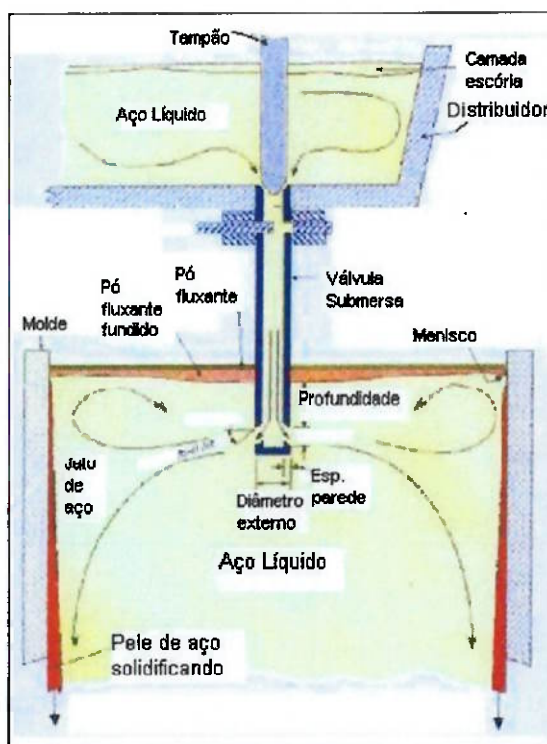


Figura 3.7 Esquema simplificado do escoamento do aço líquido no distribuidor e molde. [Oliveira, 2003]

### 3.3) Análise do Processo de Mistura através da Modelagem Matemática

Os processos metalúrgicos em sua grande maioria, envolvem fenômenos muito complexos e muitos testes necessários para alavancar mudanças ou melhorias não podem ser realizadas diretamente nos equipamentos industriais devido aos altos custos e aos aspectos de segurança homem-máquina envolvidos. Desta forma os modelos físicos e matemáticos cada vez mais são utilizados para fundamentarem as modificações importantes, reduzindo significativamente os inconvenientes dos testes em campo.

Quando se trata de estudos relativos à mistura de aços com composições químicas diferentes no lingotamento contínuo, encontram-se vários trabalhos que analisam apenas a mistura que ocorre no distribuidor, não levando em conta a mistura no núcleo líquido do veio, abaixo do menisco no molde. Abaixo, será apresentada uma revisão dos aspectos e variáveis importantes para a mistura, revelados através da modelagem matemática.

Burns e Shade, 1992, desenvolveram estudos na "Armco Steel Company em Ashland" abordando a mistura no distribuidor e no veio, por meio de três métodos: modelo matemático, modelo físico e experimentos na fábrica.

No modelo físico, usando água e água com sal, foram feitas várias simulações com três diferentes níveis de água no distribuidor no momento da abertura da panela, a saber, 508mm (12,8t), 762mm (20,5t) e 1016mm (29,0t). Os resultados encontrados mostraram que, quanto maior o nível de aço no distribuidor, maior será o tempo para eliminação da mistura e conseqüentemente maior a região de mistura.

No modelo matemático a curva de composição química versus tempo que melhor se ajustou aos dados experimentais foi a de variação exponencial sendo então a escolhida para o estudo. Logo, o modelo foi utilizado para verificar três questões relativas ao comprimento de mistura: a) Reduzir o nível do distribuidor no momento da abertura da panela reduz o comprimento da mistura? b) Larguras maiores têm comprimentos menores de mistura? c) Transições de especificações de faixas mais estreitas para faixas mais largas resultam em comprimentos menores de mistura? Os resultados encontrados para as três perguntas acima foram os mesmos, ou seja, "SIM", como mostra a figura 3.8,

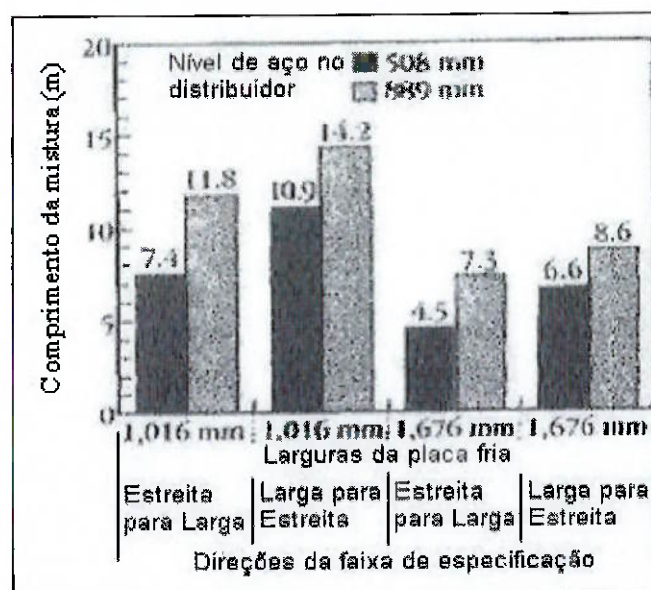


Figura 3.8 – Comparação do comprimento da região de mistura para diferentes direções de faixa de especificação, diferentes níveis de aço no distribuidor e diferentes larguras da placa fria. [Burns, 1992]

Para validar tanto o modelo matemático quanto o físico, foram retiradas amostras no molde a cada 30 segundos durante os três primeiros minutos de uma transição de aços diferentes. Adicionalmente, após resfriamento das placas de mistura, foram tiradas amostras da borda da placa separadas aproximadamente de 1,2 m umas das outras. A análise mostrou coerência entre o modelo matemático e o real e possibilitou a implantação on-line do modelo matemático, assim, segundo os autores, o modelo foi implantado no computador de nível 2 da máquina de lingotamento o qual passou a executar uma rotina de otimização de placa que tem por objetivo determinar a quantidade e o comprimento mínimos de placas de mistura, trazendo uma redução de material degradado por mistura da ordem de 25%.

É importante observar, no entanto, que o estudo não menciona a coleta de amostras no centro da placa. Desta forma, os autores podem não ter verificado a

mistura que ocorre no interior do molde, pois esta afeta a região central, mas não afeta a superfície da placa.

Mostert e Van der Bogert, 1998, descreveram um modelo desenvolvido na usina de Hoogovens, simples o suficiente para ser utilizado on-line. Foram utilizados cinco princípios básicos para qualquer máquina de lingotamento, a saber:

- A difusão molecular não é importante se comparada com o transporte devido à turbulência envolvida no processo,
- A composição do aço de entrada na máquina muda abruptamente na abertura da nova panela de aço de qualidade diferente,
- Os primeiros traços do aço da nova panela surgem um certo tempo após a abertura da mesma,
- No distribuidor o aço mistura-se relativamente bem,
- No veio também ocorre alguma mistura.

Além destes princípios, duas simplificações foram assumidas:

- Reações químicas na panela, no distribuidor e no molde não são consideradas,
- A geometria da máquina não muda durante o lingotamento e chapas separadoras de qualidade no molde não são utilizadas/modeladas.

A validação do modelo foi conduzida em dois passos, utilizando o conceito de concentração adimensional,  $C \equiv (F_{(t)} - F_{ant}) / (F_{pos} - F_{ant})$ , onde  $F_{(t)}$  é a fração de um dado elemento no aço;  $F_{ant}$  e  $F_{pos}$  são as frações desse elemento nas corridas anterior e posterior respectivamente, no qual, todas as concentrações adimensionais crescem de 0 (abertura da panela) até 100%. Primeiro a composição

do aço no molde foi estudada a partir de amostras da produção habitual e os parâmetros do modelo foram ajustados para dar o mínimo de diferença. Em seguida o modelo foi implementado no computador de processo para acompanhamento on-line e verificação da composição obtida comparada com o modelo, conforme pode ser observado na figura 3.9,

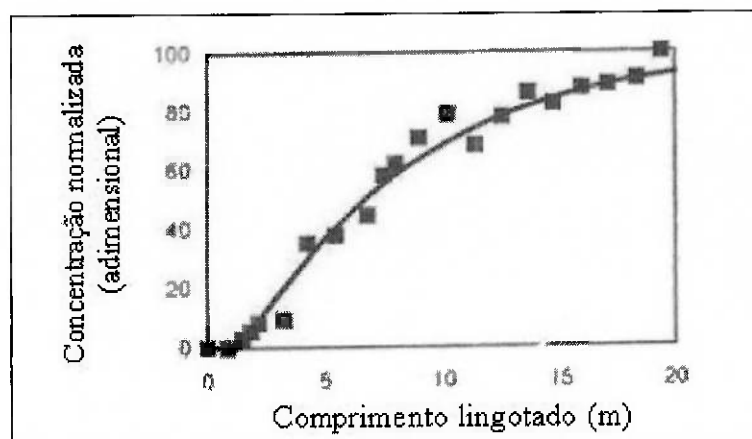


Figura 3.9 – Concentração adimensional do Carbono em função da distância lingotada, durante uma transição de qualidade. A linha é o resultado do modelo e os símbolos das medições. [Mostert e Van der Bogert, 1998]

É importante observar novamente que o estudo não menciona a coleta de amostras no centro da placa, o que não deixa claro a verificação da mistura abaixo do menisco no molde.

Os dados requeridos pelo modelo devem estar disponíveis antes do mesmo ser acionado para cálculo on-line. Para o modelo desenvolvido pelos autores, são 8 os dados necessários para máquinas de lingotamento de placas de dois veios: momento da abertura da panela nova, volume do distribuidor e, para cada um dos dois veios, a largura, a espessura e a velocidade de lingotamento. A quantidade de aço deixando a máquina é calculada a partir das dimensões e velocidades de lingotamento dos veios.

Como resultado ao uso do modelo, tanto pelo departamento de planejamento (otimização da programação de mistura para a próxima semana) como

pelo operador do lingotamento (otimização da placa de mistura sob as condições reais de lingotamento), foram apresentados os seguintes benefícios: redução na geração de mistura e no consumo de distribuidor pelo agrupamento de aços compatíveis utilizando o modelo off-line e otimização do comprimento lingotado utilizando o modelo on-line.

É muito importante ressaltar a observação deste artigo sobre o uso do modelo pelo pessoal de planejamento, pois desta forma é possível planejar seqüenciais mais longos com menos misturas. Em caso de não cumprimento do planejamento devido situações de emergência, o uso do modelo para otimização da região de mistura ameniza o problema.

Damle e Sahai, 1995, desenvolveram um modelamento matemático da mistura de aço no distribuidor (não foi considerada a mistura no veio) durante mudança de qualidade no processo de lingotamento contínuo de placas de aço. Foram considerados os fenômenos de transferência de calor e os efeitos transientes do escoamento turbulento. As seguintes variáveis foram examinadas: o nível de aço no distribuidor no momento da abertura da nova panela, a taxa de reenchimento do distribuidor, o uso de barragens e diques e se a transição acontece do aço de menor faixa de composição química especificada para maior ou vice-versa. Foram utilizadas equações de conservação de massa, conservação do movimento para escoamento turbulento e conservação de energia térmica. Além de esclarecer a importância do efeito térmico, o modelo matemático foi usado para estudar o efeito de vários parâmetros de lingotamento, tais como: nível de aço no distribuidor no momento da abertura da panela, a taxa de enchimento do distribuidor com o novo aço, a presença de barragens e diques e o efeito da faixa de especificação dos aços

(de estreita para larga ou larga para estreita). Os autores observaram que reduzir o máximo possível o nível de aço no distribuidor antes da abertura da nova panela com grau de aço diferente, usar barragens, diques ou controladores de fluxo e reduzir o tempo de residência do aço no distribuidor ajudam a reduzir a mistura.

Para avaliar a importância do efeito térmico foram estudas três diferentes condições (duas não-isotérmicas e uma isotérmica). Nos casos não-isotérmicos a perda de calor ocorre principalmente pela camada de escória. A figura 3.10 mostra o perfil da composição de saída do modelo de Damle e Sahai, 1995, em função do tempo para distribuidores sem uso de barragens e diques. Nos três casos o nível de aço no distribuidor foi reduzido à metade do nível normal de operação e reenchido a uma taxa duas vezes maior do que a velocidade de lingotamento. Os resultados encontrados mostram perfis muito similares, ou seja, a influência das condições térmicas simuladas na extensão da mistura formada no distribuidor é insignificante. Com o uso de barragens e diques os estudos mostraram uma variação nestes perfis, mas nada significativo quando se trata de alcançar acima de 95% da composição do novo aço.

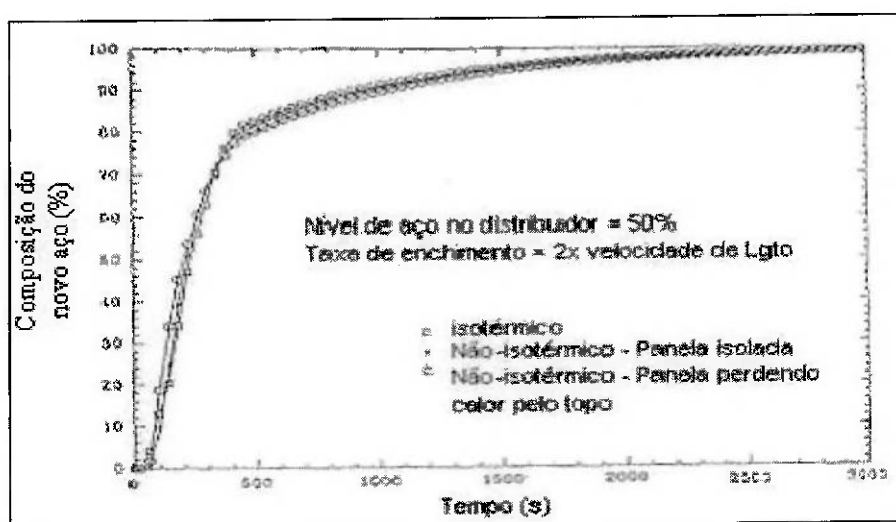


Figura 3.10 - Perfil de concentração de saída para condições isotérmicas e não-isotérmicas para o distribuidor sem mecanismos de controle de fluxo, em estado estacionário com uma vazão de 2,84t/min. [Damle e Sahai, 1995]

Para verificar o efeito do nível de aço no distribuidor, a figura 3.11 mostra os perfis de concentração de saída do modelo em função do tempo, para diferentes volumes de aço no distribuidor no momento da abertura da nova panela. Em cada caso, o reenchimento do distribuidor foi à taxa duas vezes a velocidade de lingotamento. A curva para o caso em que o distribuidor estava com 25% do volume normal de operação foi a mais íngreme, e a razão é que, para um dado escoamento, o tempo de residência do fluido será tanto menor quanto menor for o volume. Conseqüentemente, o tempo de transição e a extensão da mistura também serão menores. Logo, na prática operacional esta estratégia deve ser adotada.

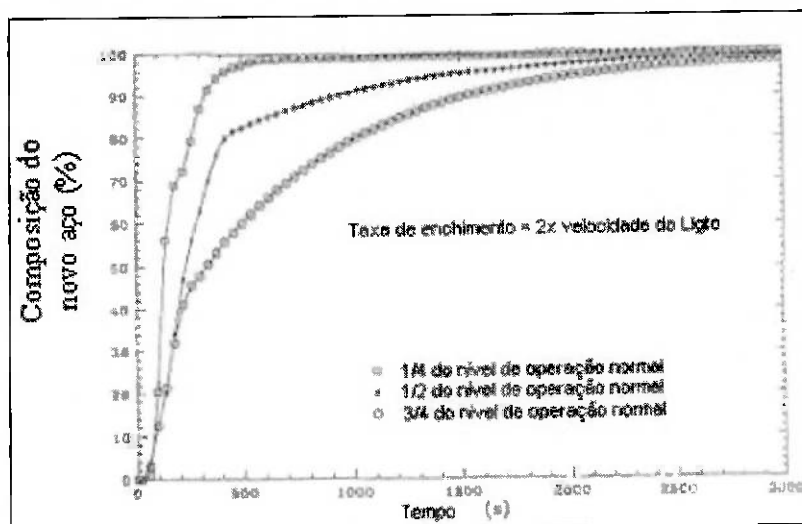


Figura 3.11 – Concentração de saída para o distribuidor (sem mecanismo de controle e condições isotérmicas) com três níveis de aço no distribuidor. Estado estacionário a 2,8t/min. Nível de operação normal a 1,2m. [Damle e Sahai, 1995]

Com relação ao efeito da taxa de reenchimento do distribuidor após a abertura da nova panela, não foi encontrada uma correlação simples com a quantidade de mistura. A figura 3.12 mostra os perfis de concentração de saída do modelo desenvolvido por Damle e Sahai, 1995 para quatro diferentes estratégias de reenchimento: (1) 1,5x a velocidade de lingotamento em estado estacionário após abertura da nova panela, (2) 2x, (3) 4x e (4) manter por 200 segundos o nível baixo

e aumentar a vazão para 4x a velocidade de lingotamento até atingir o nível operacional. Em cada caso, o nível de aço no distribuidor no momento da abertura da nova panela foi de 50% do volume normal de operação. Assim, pode-se perceber na figura 3.13, que o efeito da taxa de reenchimento do distribuidor varia com a especificação de aceitação da mistura. Logo, para a faixa de aceitação entre 20 e 80% da composição do novo aço, a menor extensão de mistura é obtida com taxa combinada de manter 200seg e aumentar a 4x a velocidade de lingotamento e a segunda menor extensão foi obtida para taxa de 2x a velocidade de lingotamento. Para aceitação entre 10 e 90%, a menor extensão é também alcançada com a taxa combinada de manter 200seg e aumentar a 4x a velocidade de lingotamento, e a segunda menor extensão com a taxa de 1,5x. Para aceitação entre 0 e 100% a taxa de reenchimento não é representativa. Observando a curva da quarta estratégia percebemos que é a melhor situação quando se trata de reduzir a extensão da mistura, porém o estudo não faz referências quanto à qualidade interna da placa, uma vez que pode haver influência no mecanismo de flotação de inclusões não metálicas e arraste de escória para o molde. Para o caso de distribuidores com uso de barragens e diques e considerando atingir pelo menos 95% da composição do novo aço, também não há diferenças significativas.

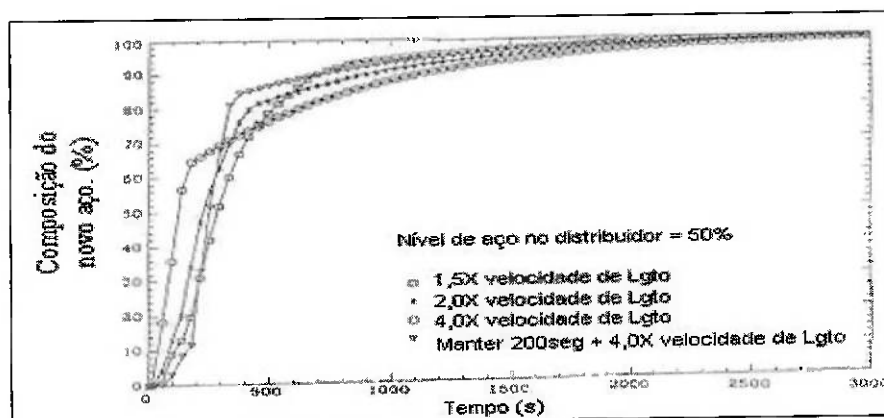


Figura 3.12 – Concentração de saída para o distribuidor (sem mecanismo de controle e condições isotérmicas) com quatro diferentes estratégias de enchimento do distribuidor. Estado estacionário a 2,8t/min. [Damle e Sahai, 1995]

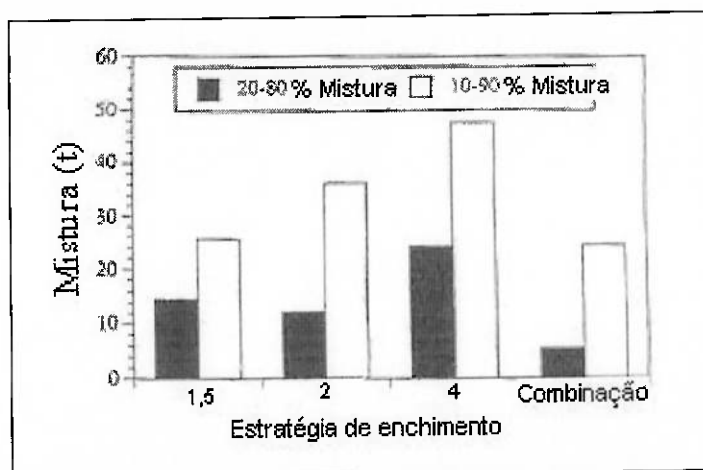


Figura 3.13 – Comparação entre a quantidade prevista de mistura obtida por diferentes estratégias de enchimento do distribuidor. [Damle e Sahai, 1995]

No que tange ao efeito da faixa de especificação dos aços envolvidos na mistura, os pesquisadores estudaram os seguintes casos:

- 1º) Corrida anterior com carbono na faixa de 0,03 a 0,05% e corrida posterior com carbono na faixa de 0,13 a 0,17%.
- 2º) Corrida anterior com carbono na faixa de 0,13 a 0,17% e corrida posterior com carbono na faixa de 0,03 a 0,05%.

Como mostrado nas figuras 3.14 e 3.15, os autores observaram que no primeiro caso o tempo de transição foi de 396 s (equivalente a 18,7t para o caso estudado) e que, no segundo, foi de 860 s (equivalente a 40,7t para o caso estudado). Desta forma, concluiu-se que há vantagens em programar as mudanças de qualidade para que os aços de menores faixas especificadas sejam as corridas anteriores.

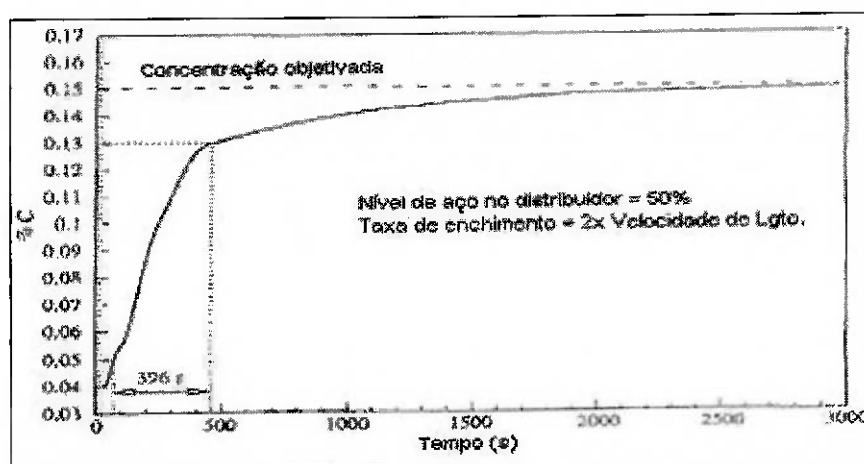


Figura 3.14 – Concentração de saída mostrando o tempo de transição de especificação mais estreita para mais larga. [Damle e Sahai, 1995]

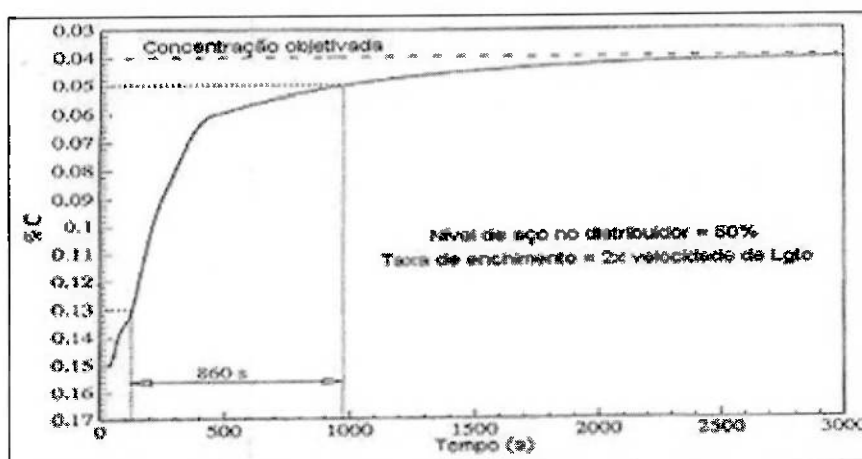


Figura 3.15 – Concentração de saída mostrando o tempo de transição de especificação mais larga para mais estreita. [Damle e Sahai, 1995]

Huang e Thomas, 1996, para definir a distribuição da composição química da placa de mistura, desenvolveram um modelo computacional, inteiramente transiente, subdividido em três submodelos: Submodelo de mistura no distribuidor, Submodelo de mistura no núcleo líquido do veio e Submodelo de mistura na solidificação. Como esquematizado na figura 3.6, o “novo” aço proveniente da próxima panela, irá se misturar com o aço remanescente no distribuidor. Esse aço misturado flui para o molde e se mistura novamente ao longo do núcleo líquido do

veio em solidificação. Em função da região de mistura, os autores listaram algumas estratégias para seqüenciar a máquina de lingotamento:

- a) Lingotar continuamente mesmo com qualidades diferentes. Este método evita completamente perdas na produtividade, mas produz a quantidade máxima de aço misturado que necessitará ser degradado (Huang e Thomas, 1993),
- b) Parar a máquina a cada mudança de qualidade incompatível. Isso elimina a mistura completamente, mas reduz consideravelmente a produtividade, gera perdas de rendimento devido aos descartes de início e final de veio, perdas por não lingotamento do aço remanescente no distribuidor e aumento de custo devido à redução da vida do distribuidor (Sussman e Watson, 1993, apud Huang e Thomas, 1996).
- c) Trocar o distribuidor para receber o aço da nova panela. Este método garante que a mistura ocorra somente no veio, mas exige da operação uma perda de rendimento do aço remanescente no distribuidor, além de limitar a vida deste,
- d) Inserir uma chapa separadora no molde instantes antes de abrir a nova panela. A chapa do tipo perfeita é capaz de impedir completamente a mistura no veio, entretanto, requer significativa redução de velocidade ou mesmo uma parada do veio, o que incorre a riscos de excessiva contração, trincas no veio, rompimento de veio, e mesmo danos à máquina. A chapa do tipo parcial é capaz de impedir significativamente a mistura no veio e é mais fácil de introduzir com menos redução de velocidade e riscos de danos à máquina (Schmidt e Ozgu, 1986)

Uma programação otimizada procura agrupar o máximo possível os aços de qualidades iguais ou compatíveis visando a mínima geração de mistura, porém nem sempre é possível o seu cumprimento integral na planta. O modelo

desenvolvido por Huang e Thomas, 1996, calcula a distribuição da composição química da região de mistura, permitindo a escolha da melhor estratégia para minimizar a degradação, em função de algumas condições de lingotamento, a saber: velocidade de lingotamento ( $v_c$ ), volume total do distribuidor ( $V_T$ ) e vazão de entrada de aço no distribuidor ( $Q_{in}$ ), os quais variam com o tempo, durante uma típica troca de panela no seqüencial de lingotamento como mostrado na figura 3.16.

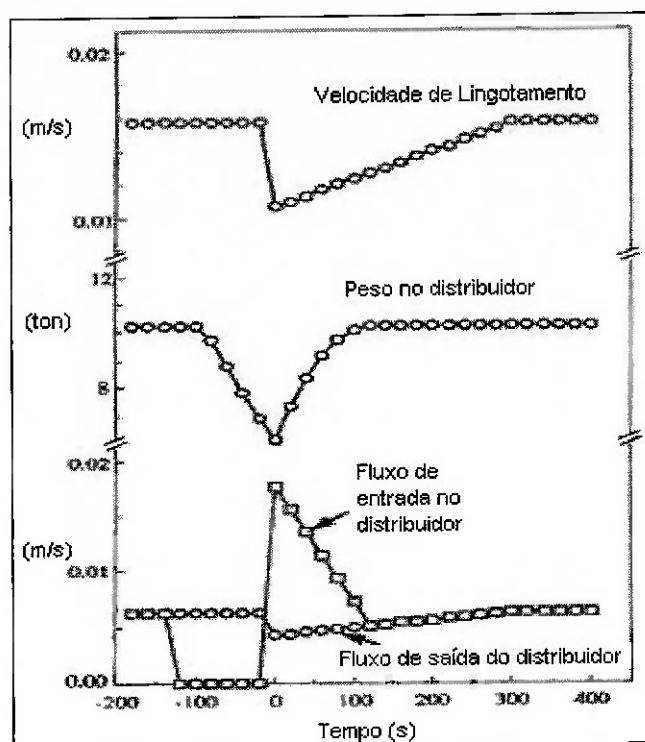


Figura 3.16 – Variação típica de velocidade de lingotamento, peso de aço no distribuidor e vazões de entrada e saída no distribuidor durante uma troca de panela. A abertura da nova panela ocorre em  $t = 0$ ; quando  $t < 0$ , tem-se os eventos que ocorrem antes desta abertura. [Huang e Thomas, 1996]

Conforme os autores, a velocidade de lingotamento geralmente é reduzida para possibilitar a troca das panelas, o que acaba fornecendo mais tempo para a transição e permitindo mais solidificação no veio, encurtando o comprimento do núcleo líquido e diminuindo o comprimento da mistura. A quantidade do aço anterior remanescente no distribuidor é importante porque é um dos fatores que

definem a extensão da mistura. Então, para reduzir a quantidade misturada, procura-se baixar o máximo possível o nível do aço anterior no distribuidor ou até mesmo efetuar a troca deste. A vazão de entrada no distribuidor cai a zero no período da troca de panela, subindo rapidamente quando da abertura da nova panela e reduzindo proporcionalmente até se igualar à vazão de saída do distribuidor até que a velocidade de lingotamento e o volume de aço no distribuidor alcance seus regimes estacionários objetivados. A difusão no aço sólido é insignificante se comparada ao fluxo turbulento, assim, o perfil inicial da pele solidificada permanece completamente com o aço anterior. O fluxo turbulento na entrada do molde pode penetrar profundamente no núcleo líquido, levando aço misturado em posições bem distantes abaixo do menisco no momento da abertura da nova panela. Desta forma, a mistura aumenta com a velocidade e em direção à linha central, a qual solidifica por último. Considerando que o volume do líquido contido no veio é similar àquele drenado do distribuidor, a mistura no veio é muito importante. Se a distribuição da composição na placa final deve ser predita exatamente, eventos como a história do volume do distribuidor após a panela ser aberta, e a história da velocidade de lingotamento, devem ser levados em conta em um modelo inteiramente transiente, que inclui mistura no distribuidor e no veio.

Conforme Huang e Thomas, 1993, a composição do líquido pode ser especificada na forma adimensional como:

$$C \equiv (F_{(t)} - F_{\text{ant}}) / (F_{\text{pos}} - F_{\text{ant}}) \quad [1]$$

onde  $F_{(t)}$  é a fração de um dado elemento no aço;  $F_{\text{ant}}$  e  $F_{\text{pos}}$  são as frações desse elemento nas corridas anterior e posterior respectivamente. Nesta definição, todas as concentrações variam entre a concentração anterior, 0 ou 0%, e a posterior, 1 ou 100%. O conceito adimensional é útil porque a maioria dos elementos são

igualmente misturados, segundo Huang e Thomas, 1993. Possíveis exceções incluem o carbono e o alumínio, que difundem rapidamente no sólido, e podem também reagir para formarem precipitados, dependendo da qualidade.

Conforme mencionado no item 3.3.2, o distribuidor se caracteriza pela existência de três regiões de volumes distintas: Volume pistonado,  $V_p$ , Volume de mistura perfeita,  $V_m$ , e volume morto,  $V_d$ . De acordo com Kemeny, 1981 e Huang e Thomas, 1996, estes volumes são definidos por:

$$V_m = (t_r - t_p) Q_{in} \quad [2]$$

$$V_p = t_p Q_{in} \quad [3]$$

$$V_d = V_T - t_r Q_{in} \quad [4]$$

$$V_T = V_m + V_p + V_d \quad [5]$$

onde  $Q_{in}$  é a vazão de entrada no distribuidor,  $V_T$  é o volume total do distribuidor,  $t_r$  é o tempo médio de residência (tempo médio para um elemento do fluido percorrer o distribuidor) e  $t_p$  é o tempo de fluxo pistonado (momento em que o novo aço aparece). Experiências com injeção de traçadores são muitas vezes efetuadas para se obter o  $t_p$  e o  $t_r$ , que são calculados a partir de curvas de concentração versus tempo. Os autores comentam que todos os modelos pesquisados resolvem as equações tridimensionais de Navier-Stokes para escoamento turbulento e a equação de transporte de soluto. Um dos parâmetros críticos nestes cálculos, o qual controla a extensão da mistura, é o coeficiente de difusão efetivo,  $D_{eff}$ , definido por:

$$D_{eff} = D_o + v_t / Sc_t \quad [6]$$

onde  $Sc_t$  é o número turbulento de Schmidt que geralmente é ajustado igual a um significando que a difusão de massa turbulenta (coeficiente de difusão turbulenta,  $D_t$ ) é igual ao transporte de movimento turbulento (Viscosidade cinemática turbulenta,  $v_t$ ) e é independente da composição. O coeficiente de difusão molecular,

$D_o$ , é medido por um dado elemento difundindo através de um outro dado elemento ocorrendo, nestes cálculos, um erro pequeno da ordem de  $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ . Isto explica porque o comportamento da mistura de todos os elementos é previsto ser aproximadamente o mesmo, conforme Huang e Thomas, 1993.

### **Submodelo de mistura no distribuidor**

O primeiro submodelo calcula a mistura no distribuidor, a qual determina a composição do aço que entra no molde e controla a composição de superfície do produto final. Para o desenvolvimento deste submodelo, o distribuidor foi dividido em duas metades simétricas. Cada metade, dividida em três regiões diferentes como já mencionado, isto é, região de fluxo pistonado, região de mistura perfeita e região de volume morto. Para explicar os efeitos transientes, cada região foi dividida em dois componentes, criando desse modo um total de seis frações do volume do distribuidor, que são ilustradas na figura 3.17. Os primeiros três componentes formam a primeira zona do distribuidor. O Fluxo de aço da panela entra na primeira fração de fluxo pistonado, p1. O fluxo se divide então para entrar na primeira fração de volume morto, d1, e na primeira fração de mistura perfeita, m1. O fluxo de aço que sai da primeira fração de mistura perfeita entra na segunda zona do distribuidor, iniciando pela segunda fração de mistura perfeita, m2, da qual o aço se divide novamente e uma parte vai para dentro da segunda fração de volume morto, d2, e a outra para a segunda fração de volume pistonado, p2. A vazão e a concentração de saída da fração p2 é igual a vazão e a concentração de saída do modelo de mistura no distribuidor, uma vez que esta fração é a última do modelo.

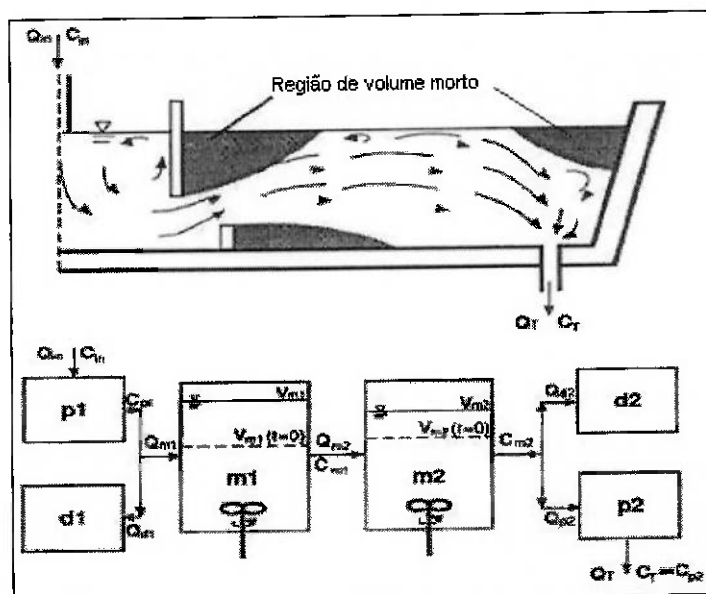


Figura 3.17 – Esquema de um distribuidor de lingotamento contínuo e suas seis frações de volume. [Huang e Thomas, 1996]

Segundo Huang e Thomas, 1996, o submodelo de mistura no distribuidor foi comparado com resultados obtidos em modelo físico de água no centro de pesquisas da Armco, Watson, Huang, e Thomas, 1994, e verificou-se um excelente resultado como mostrado na figura 3.18. Foram feitas duas comparações entre o modelo matemático e o modelo físico, uma para baixas velocidades de reenchimento do distribuidor, isto é, de 5.1t para 10.2t em 2 minutos para uma rampa de recuperação da velocidade de lingotamento de 0.64 m/min para 1.0 m/min em 5 minutos, e outra para alta velocidade de reenchimento do distribuidor, isto é, de 4.1t a 10.2t em 1,5 minutos para uma velocidade de lingotamento constante de 1.13 m/min.

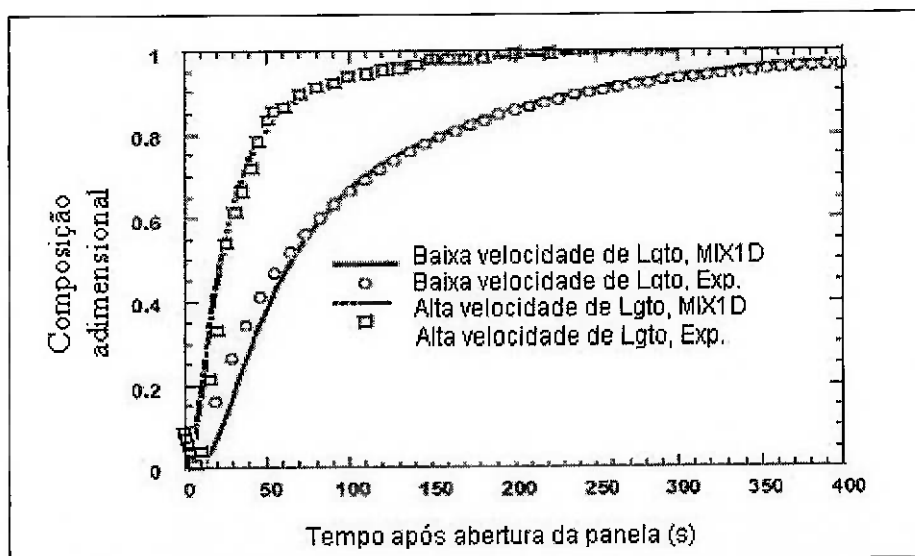


Figura 3.18 – Comparação entre concentração adimensional prevista pelo submodelo de mistura no distribuidor e os resultados obtidos em modelo físico de água no centro de pesquisas da Armco. [Huang e Thomas, 1996]  
(MIX1D = Denominação dada ao modelo matemático)

### Submodelo de mistura no veio

A concentração que entra no molde em função do tempo afeta significativamente a distribuição da composição no produto final, Huang e Thomas, 1993. O segundo submodelo considera a mistura no veio, dividindo o veio em três zonas, S1, S2 e S3, como descritas na figura 3.19. Estas incluem duas zonas bem misturadas na região superior do molde, S1 e S2, e uma zona de difusão na porção inferior do núcleo líquido até o comprimento metalúrgico (ponto final de solidificação), S3. Uma aproximação da mistura é novamente usada para simular as zonas superiores e uma equação da difusão unidimensional por diferenças finitas é resolvida na zona inferior.

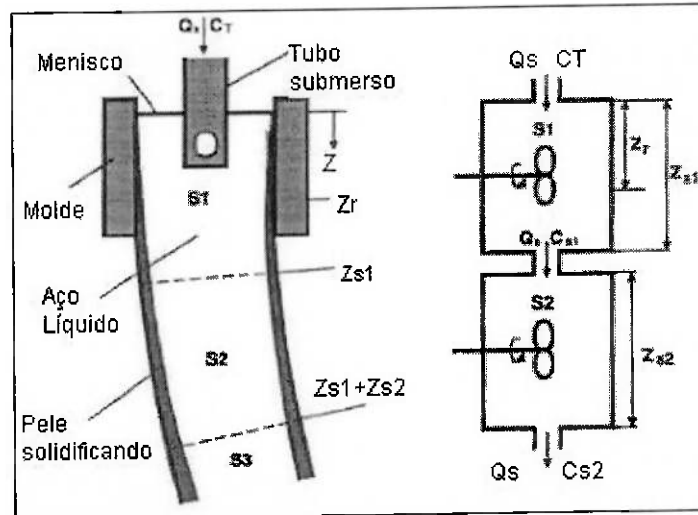


Figura 3.19 – Representação esquemática das três zonas do Submodelo de mistura no veio. [Huang e Thomas, 1996]

### Mistura na região superior do veio

Como na região superior do veio há forte turbulência devido à chegada do aço proveniente do distribuidor, esta região é dividida em dois volumes de mistura ligados em série, S1 e S2, para simplificação. A concentração é governada por equações similares àsquelas empregadas no modelo do distribuidor:

$$dC_{s1}/dt = Q_{s1}/V_{s1} * (C_T - C_{s1}) \quad [7]$$

$$dC_{s2}/dt = Q_{s2}/V_{s2} * (C_{s1} - C_{s2}) \quad [8]$$

onde,  $C_{s1}$  e  $C_{s2}$  são as adimensionais das regiões S1 e S2 respectivamente,  $C_T$  é a concentração que entra na primeira zona a partir do distribuidor, é obtida do modelo de mistura no distribuidor descrito na seção anterior,  $C_{p2}$ . Em caso de troca de distribuidor,  $C_T$  é ajustada para "um", representando a nova qualidade.  $Q_{s1}$  e  $Q_{s2}$  são as vazões de aço entrando nessas regiões,  $V_{s1}$  e  $V_{s2}$  são os seus volumes. Na abertura da panela, cada zona contém somente a nova qualidade, a qual define a condição inicial:

$$C_{s1}(t=0) = C_{s2}(t=0) = 0 \quad [9]$$

A vazão de aço através de cada zona é calculada por:

$$Q_{s1} = Q_{s2} = Q_s = E * L * v_c(t) \quad [10]$$

Onde, E é a espessura do veio (m), L é a largura do veio (m),  $v_c$  é a variação da velocidade de lingotamento com o tempo (m/s)

O volume de cada zona corresponde aproximadamente aos volumes recirculados das zonas superior e inferiores, observados nas máquinas de lingotamento contínuo de aço com tubos submersos com duas saídas, e são:

$$V_{s1} = E * L * Z_{s1} \quad [11]$$

$$V_{s2} = E * L * Z_{s2} \quad [12]$$

Onde,  $Z_{s1}$  e  $Z_{s2}$  são os comprimentos específicos, determinados empiricamente, para cada zona de mistura.

### **Mistura por difusão na região inferior do veio**

O aço que sai da segunda zona de mistura da região superior do veio, S2, entra na região inferior do veio, S3. Nesta zona, o aço está se movendo para baixo a uma velocidade uniforme. Uma mistura adicional ocorre devido à difusão turbulenta enquanto o aço permanece líquido. Segundo os autores, macrosegregação pode também ocorrer, mas é ignorada no modelo, o qual supõe toda segregação ocorrer apenas em microescala, ou seja, na forma de microsegregação. Assim, uma equação unidimensional transiente de transferência de massa é utilizada para a variação da concentração com o tempo,  $C_{s3}$ , entre o fim da segunda zona de mistura, S2, e o fim do núcleo líquido.

Conforme Cardoso filho e colaboradores, 2007, a mistura no molde ocorre predominantemente na sua parte superior, S1 e S2, devido à intensa turbulência que caracteriza esta região, portanto um detalhamento maior da região S3 não será objeto do presente trabalho.

Conforme Huang e Thomas, 1996, é muito difícil medir a composição do aço no núcleo líquido, e quanto mais profundo no veio mais difícil. Assim, para calibrar e verificar o submodelo de mistura no veio, as concentrações praticadas no modelo "MIX1D" foram comparadas com aquelas obtidas usando o modelo tridimensional de transferência de massa e fluxo turbulento, o qual foi desenvolvido e resolvido previamente por Huang e Thomas, 1993, usando métodos de diferenças finitas. A figura 3.20 confirma que as diferenças entre os modelos 1-D e 3-D são muito pequenas.

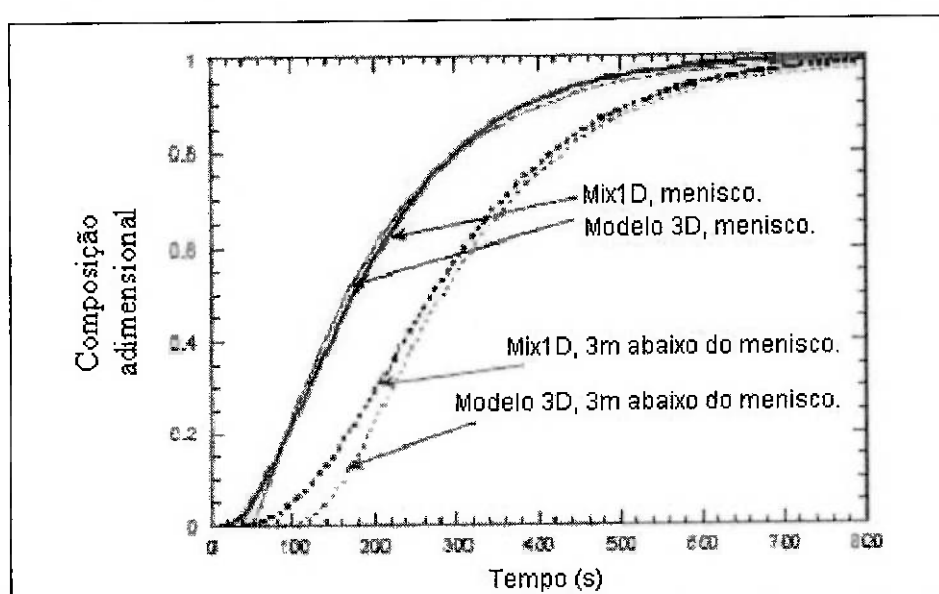


Figura 3.20 – Comparação entre concentração adimensional prevista pelo submodelo de mistura no veio 1D com o modelo 3D. [Huang e Thomas, 1996]

### Submodelo de composição final da placa

O último submodelo proposto por Huang e Thomas, 1996, calcula a distribuição da composição na placa relacionando por integração, as composições CS1, CS2 e Cs3 com a variável de tempo,  $t_{sh}$ , que representa o tempo necessário de solidificação de um ponto na pele que se desloque do menisco à posição  $z$  no veio. Como o tempo de solidificação varia com a velocidade de lingotamento, este procedimento permite levantar o perfil de solidificação do núcleo líquido.

Como visto na figura 3.21, aproximações muito boas entre o previsto pelo submodelo de composição final da placa e as medições, foram alcançadas ao longo de ambas superfície e centro das placas. As medições foram feitas em placas desclassificadas, por mistura, de aço inoxidável, lingotadas na Armco Butler Works. As curvas também explicam porque as medições para assegurar que as especificações no produto final são satisfeitas freqüentemente focando na linha central do aço anterior e a superfície do aço posterior.

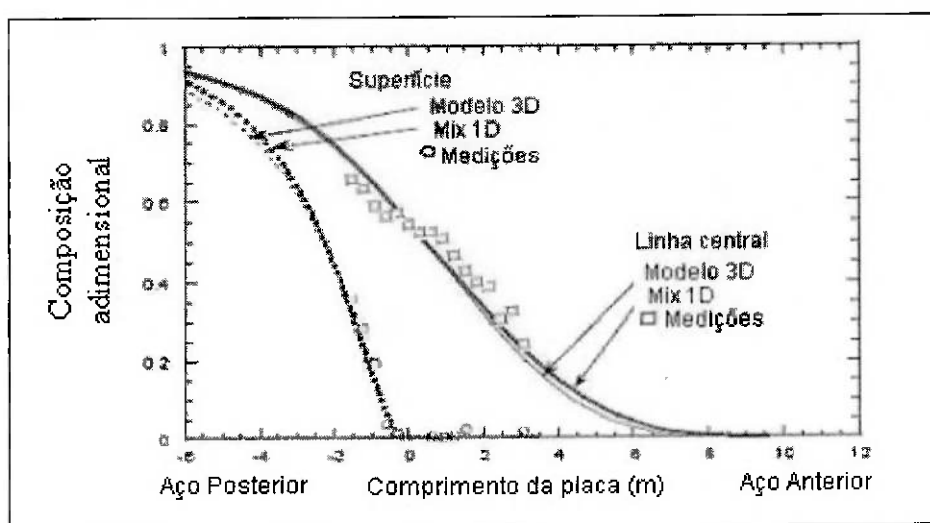


Figura 3.21 – Comparação da composição prevista da placa com medições realizadas na Armco Works para uma troca de panela padrão. [Huang e Thomas, 1996]

“O zero “0” na abscissa, significa o menisco no momento da abertura da nova panela”.

#### **4.0) ANÁLISE DE UMA PLACA DE MISTURA DA COSIPA**

Como mencionado anteriormente, as máquinas de um veio da Cosipa não possuem sistema automático para determinação da região de mistura. O operador conta apenas com um padrão de descarte elaborado empiricamente. Com o aumento da produção de aços API (aços projetados para atender aos requisitos da norma “American Petroleum Institute”, em sua grande maioria, são aços microligados). Foi observado que, para os casos de mistura envolvendo esta qualidade, o padrão precisava ser ajustado.

Sem poder contar com automação e a instalação de um modelo matemático para realizar este ajuste, foi realizado um trabalho comparando o padrão adotado pela Usiminas e o da Cosipa e concluiu-se que a região de mistura, nestes casos, deveria ser um pouco acrescida, isto é, 1990mm a mais em caso de troca de distribuidor e 2700mm a mais nos casos que não há troca de distribuidor, conforme explicado no item 3.2.1.

Para validar o aumento determinado, amostras na ponta e/ou cauda de placas vizinhas à região de mistura foram tiradas para garantir a composição química desejada. Como estas amostras não demonstram o perfil da composição química da placa, foi realizada uma amostragem com base na figura 4.1 visando conhecer o comportamento da composição química da placa de mistura em um caso de mistura envolvendo aço API.

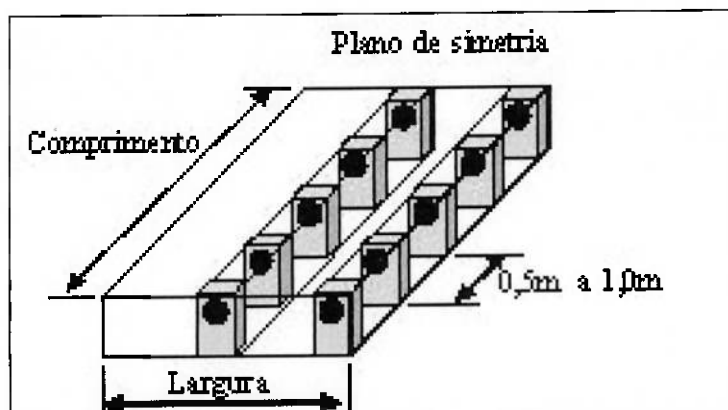


Figura 4.1 – Desenho esquemático mostrando posição para retirada de amostras. Após retirados os tarugos, espaçados entre 0,5 a 1,0m, na linha central e de superfície da placa, as amostras foram retiradas a  $\frac{1}{4}$  da espessura da placa.

As Figuras 4.2 e 4.3 apresentam respectivamente as concentrações adimensionais de Mn e V, definidas como  $C \equiv (F_{(t)} - F_{ant}) / (F_{pos} - F_{ant})$ , conforme explicado no item 3.3, em função da distância ao menisco. As amostras foram coletadas na placa fria após lingotamento. A placa selecionada foi a placa definida como placa de mistura pelo operador do lingotamento durante a produção. O “zero” na ordenada corresponde ao limite superior da corrida anterior e o “um” ao limite inferior da corrida posterior. Na abscissa, os valores negativos correspondem às distâncias das amostras ao menisco (abaixo do menisco). Os valores positivos, acima do menisco. As linhas pontilhadas prolongam os pontos “0” e “1” da ordenada mostrando seu cruzamento com a curva da composição química delimitando a região da placa de mistura que não atende à nenhuma das duas corridas envolvidas. A mistura foi gerada em um seqüencial da Máquina de Lingotamento Contínuo nº 02, sob padrão normal de velocidade, sem troca de distribuidor (5 t de aço remanescente da corrida anterior no momento da abertura da nova panela), durante a troca das panelas com aços diferentes, sendo a corrida anterior de nº 756927 (aço 452) e a corrida posterior de nº 756929 (aço 652 API). Foram analisados os elementos “Mn” e “V” cujas especificações estão mostradas na Tabela 1.

Tabela 1: Especificação de “Mn” e “V” para os aços 452 e 652 da Cosipa

| Aço 452 | Mín | Obj  | Máx   | Aço 652 | Mín   | Obj   | Máx  |
|---------|-----|------|-------|---------|-------|-------|------|
| Mn (%)  | 1,0 | 1,05 | 1,2   | Mn (%)  | 1,45  | 1,47  | 1,6  |
| V (%)   | 0   | 0    | 0,005 | V (%)   | 0,065 | 0,071 | 0,08 |

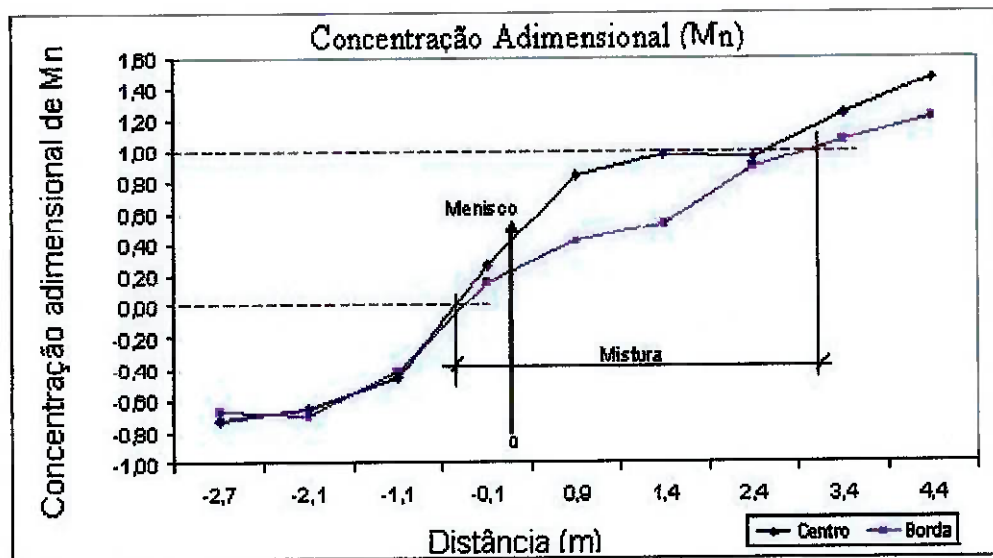


Figura 4.2 – Composição adimensional do “Mn” em função da distância (posição da amostra na placa, conforme figura 4.1).

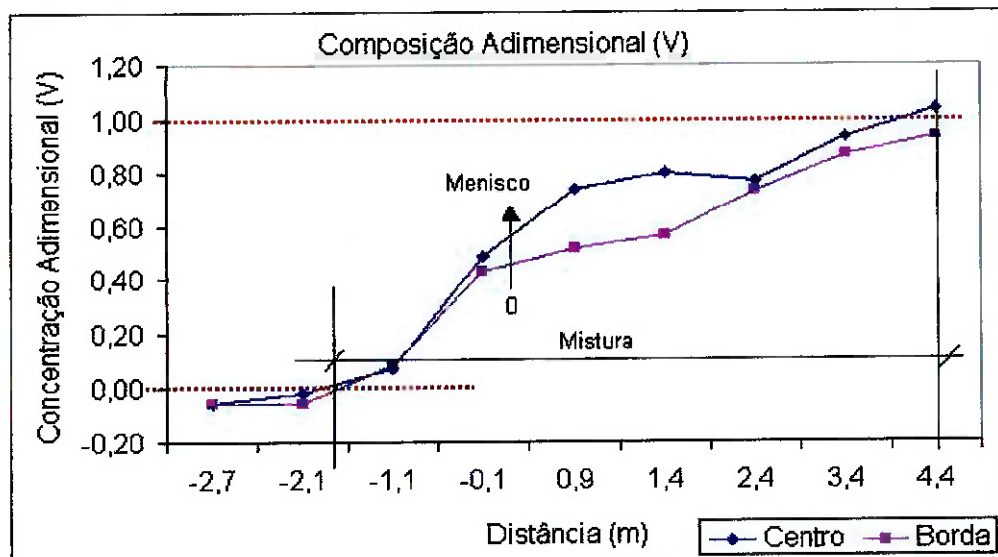


Figura 4.3 – Concentração adimensional de “V” em função da distância (posição da amostra na placa, conforme figura 4.1)

Por esta amostragem pode-se concluir que a nova tabela está coerente para este tipo de mistura, pois mesmo para o “V”, cuja mistura foi mais agressiva, a região misturada ficou dentro da faixa de aceitação de 95%, ou seja, a placa de mistura definida pelo operador, com base na nova tabela, ficou com um comprimento de 7,1m (veja na abscissa das figuras 4.2 e 4.3 [2,7+4,4]) e a composição química compreendida entre o limite superior da corrida anterior (“zero” na ordenada) e o limite inferior da corrida posterior (“1” na ordenada), conforme explicado nas figuras 3.5a e 3.5b, ficou com um comprimento menor (em torno de 6,5m [4,4+2,1] e alocado dentro desta faixa dos 7,1m.

Cabe ressaltar, no entanto, que outras análises deverão ser elaboradas para abranger maior representatividade.

## 5.0) CONCLUSÕES

Para redução da extensão de mistura durante o lingotamento de aços de qualidade diferentes, a literatura recomenda:

- Trocar distribuidor antes de abrir a panela que contém o novo aço incompatível,
- Reduzir o máximo possível o nível de aço no distribuidor para abertura da nova panela,
- Manter nível baixo do distribuidor por um tempo e depois reencher à taxa de 1,5x a velocidade de lingotamento,
- Lingotar aços com faixas de especificações mais estreitas antes de aços com faixas mais largas,
- O uso de modelos matemáticos pela equipe de planejamento facilita a definição de seqüenciais de lingotamento maiores com menos misturas, o que permite aumento na produtividade e redução de custos,
- O uso de modelos matemáticos pela equipe de operação facilita a otimização da placa de mistura, reduzindo seu comprimento e o impacto causado pelas situações de emergência que forcem o não cumprimento do seqüencial programado.
- Menores velocidades de lingotamento e menores espessuras permitem maior solidificação no veio, reduzindo a extensão de mistura,
- Usar chapa separadora no molde instantes antes de abrir a nova panela.

## 6.0) REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] Barbosa, F.A.: Modelamento Matemático e Físico do escoamento do aço líquido em diferentes projetos de distribuidor do lingotamento contínuo da Usiminas. Belo Horizonte: Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Escola de Engenharia da UFMG, Dissertação de mestrado, Julho-2002.
- [02] Burns, M.T.; Schade, J.; Brown, W.A. and Minor, K.R.: "Transition Model for Armco Steel's Ashland Slab Caster", 10th Process Technology Conference, L.G. Kuhn, ed., The Iron and Steel Society, Warrendale, PA, Toronto, Ontario, Canada, 1992, Vol. 10, pp. 177- 186.
- [03] Cardoso Filho, A.C.P. e colaboradores – Modelamento Físico e Matemático da Formação da Placa de Mistura no Lingotamento Contínuo – XXXVIII Seminário de Aciaria – Internacional – Belo horizonte, MG, Brasil – 2007.
- [04] Costa, A.M.: Modelamento Matemático da Zona de Mistura no Lingotamento Contínuo. Belo Horizonte: Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Escola de Engenharia da UFMG, Dissertação de mestrado, Maio-2003.
- [05] Damle, C. and Sahai, Y. - Modeling of Grade Change Operations During Continuous Casting of Steel - Mixing in the Tundish", Trans. ISS, Vol. 22, No. 6, 1995, pp. 49-59.
- [06] Facó, R.J. - Introdução à siderurgia – Livro ABM – Capítulo 08.
- [07] Garcia, A. e colaboradores; Lingotamento Contínuo de aços. Livro ABM – 2006
- [08] Huang, X. and Thomas, B.G.: "Intermixing Model of Continuous Casting during a Grade Transition", Metallurgical Transactions, 1996, vol. 27B, No 4 pp. 617-632.
- [09] Huang, X. and Thomas, B.G.: "Modeling of Steel Grade Transition in Continuous Slab Casting Processes", Metallurgical Transactions, 1993, vol. 24B, pp. 379-393.
- [10] Kemeny, F.; Harris, D.J.; McLean, A.; Meadowcroft, T.R.; Young, J.D.: "Fluid Flow Studies in the Tundish of a Slab Caster", 2nd Process Technology Conference, ISSAIME, Chicago, IL, 1981, Vol. 2, pp. 232-245.

- [12] Mostert, R., Gendt, G.G.M.de e Van der Bogert, R.J. The intermix models of the slab and billets casters of Hoogovens Steel in Netherlands. Steelmaking Conference Proceedings, p. 43-52, 1998.
- [13] Oliveira , L.J.S. – Análise do efeito do uso de inibidores de turbulência e da configuração da válvula submersa no escoamento do aço em máquina de lingotamento contínuo de placas. UFMG - (2003)
- [14] Rizzo. E.M.S. - Introdução aos processos de lingotamento dos aços – Livro ABM – 2006.
- [15] S. Chakraborty, T. Hirose, B. Jones and D.A.Dukelow – Transition Reduction and Simultaneous Maintenance of Steel Cleanliness in Granite City Tundishes – National Steel Corporation, 1999.
- [16] Schmidt, M. and Ozgu, M.: "Grade Separator and Strand Links for Uninterrupted Continuous Casting of Steel", 5th Int. Iron & Steel Conference, Iron & Steel Society, Inc., Washington, DC, 1986, Vol. 69, pp. 505-510.
- [17] SINHA, A.K. and SAHAI, Y. - Mathematical Modeling of Inclusion Transport and Removal in Continuous Casting Tundishes - ISIJ International, Vol. 33 (1993), No. 5, pp. 556-566
- [18] Valadares, C.A.G e colaboradores; - Lingotamento Contínuo de Placas, Curso ABM – 2005
- [19] Watson, J.; Huang, X. and Thomas, B.G. "Steel Composition Model for Continuous Slab Casting During a Grade Transition", 52nd Electric Furnace conference, Nashville, TN, Iron and Steel Society, Inc., 1994.