



REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS REDEMAT
UFOP – CETEC – UEMG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

**MODELAMENTO MATEMÁTICO DA ZONA DE MISTURA DE AÇOS EM
LINGOTAMENTO CONTÍNUO**

VINICIUS DE OLIVEIRA CRAVO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS REDEMAT
UFOP – CETEC – UEMG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

MODELAMENTO MATEMÁTICO DA ZONA DE MISTURA DE AÇOS EM
LINGOTAMENTO CONTÍNUO

Vinicius de Oliveira Cravo

Dissertação apresentada ao *Programa de Pós-Graduação da Rede Temática em Engenharia de Materiais- REDEMAT*, do convênio entre a Universidade Federal de Ouro Preto-UFOP, o Centro Tecnológico de Minas Gerais- CETEC e a Universidade do Estado de Minas Gerais- UEMG como parte integrante dos requisitos necessários à obtenção do título de *Mestre em Engenharia de Materiais e Metalurgia*.

Orientador: *Prof. Carlos Antônio da Silva, PhD*

Co-Orientador: *Afrânio Marcio Costa, MSc*

Ouro Preto – MG
Setembro de 2006

AGRADECIMENTOS

Ao professor Carlos Antonio Silva pela orientação recebida durante a execução deste trabalho.

Aos meus pais e meus irmãos pelo incentivo.

Aos colegas da CST - Arcelor Brasil, em especial ao Engenheiro Afrânio Marcio Costa pela orientação, apoio e ajuda durante a elaboração deste estudo.

Em especial à CST - Arcelor Brasil e ao Engenheiro Dimas Bahiense Moreira pelo incentivo e oportunidade de aperfeiçoamento técnico e profissional, bem como pelos recursos financeiros que viabilizaram a elaboração deste trabalho.

SUMÁRIO

Resumo	vi
Abstract	vii
Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	xiii
1. INTRODUÇÃO	01
2. OBJETIVOS	03
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	04
3.1 – Histórico do Lingotamento Contínuo	04
3.2 – Tipos de Máquinas de Lingotamento Contínuo	06
3.3 – Descrição Geral do Processo de Lingotamento Contínuo	08
3.4 – Escoamento de Aço Líquido no Lingotamento Contínuo	10
3.5 – Mistura de Aço no Lingotamento Contínuo	15
3.5.1 – Métodos para Realizar Trocas de Qualidades no Lingotamento Contínuo	16
3.5.2 – Métodos para Minimizar a Região de Mistura de Aços	17
3.5.3 – Modelos Matemáticos Aplicados à Mistura de Aços	20
3.5.4 – Modelamento Matemático Proposto por Huang e Thomas(1996)	31
3.5.4.1 – Submodelo de Mistura no Distribuidor	34
3.5.4.1.1 – Região de Mistura Perfeita	36
3.5.4.1.2 – Região de Escoamento em Pistão	38
3.5.4.1.3 – Região de Volume Morto	39
3.5.4.1.4 – Consideração para Situação Transiente	39
3.5.4.2 – Submodelo de Mistura no Veio	42
3.5.4.2.1 – Mistura na Região Superior do Veio	43
3.5.4.2.2 – Mistura na Região Inferior do Veio	44
3.5.4.3 – Submodelo da Composição Final da Placa	46
4. METODOLOGIA	50
4.1 – Validação do Modelo	59
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
5.1 – Resultados do Modelo Físico	61
5.1.1 – Resultados dos Testes Transientes a Frio no Distribuidor	61
5.1.2 – Resultados dos Testes Transientes a Quente no Distribuidor	66

5.2 – Modelamento Matemático da Transição no Distribuidor	68
5.2.1 – Análise da Influência de Algumas Variáveis de Operação sobre Comprimento da Placa de Mistura	88
5.2.1.1 – Influência do Peso de Aço no Distribuidor no Comprimento da Placa de Mistura	88
5.2.1.2 – Influência da Taxa de Enchimento do Distribuidor no Comprimento da Placa de Mistura	90
5.2.1.3 – Influência da Taxa de Extração do Distribuidor no Comprimento da Placa de Mistura	92
5.2.1.4 – Influência da Prática de “Holding” no Comprimento da Placa de Mistura	94
5.2.1.5 – Influência do Gradiente de Temperatura no Comprimento da Placa de Mistura	95
5.3 – Análise Química das Placas de Mistura Amostradas	97
6 – CONCLUSÕES	107
7 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	108
8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
ANEXOS	112

RESUMO

O aumento eficiente da produção do lingotamento contínuo requer longas seqüências de painéis sem interrupção; este é um fator de estabilidade e segurança e de redução de custo operacional. Com a entrada da Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST) no mercado de bobinas à quente a demanda de grandes variações de tipos de aço com baixa tonelagem tornou-se mais comum, e para atender este mercado sem aumento dos custos operacionais, faz-se necessária a realização de misturas de diferentes tipos de aços no mesmo distribuidor.

O objetivo deste projeto é estudar as alternativas para viabilizar a mistura de aços no distribuidor minimizando as perdas por descartes ou “down grade” das placas produzidas, isto através de modelagem física e matemática, de forma, a avaliar a influência de determinadas variáveis como: geometria do distribuidor, direcionadores de fluxo, vazão de re-enchimento do distribuidor, altura de válvula longa, peso de aço no distribuidor, utilização de tampão, etc. Pretende-se estudar a influência dos parâmetros sobre a zona de mistura, estudando-a de forma qualitativa e quantitativa.

O modelo matemático desenvolvido permitiu avaliar os efeitos das principais variáveis do lingotamento contínuo no comprimento da placa de mistura. Destaca-se o peso de aço no distribuidor como variável importante para minimizar a mistura. Esse volume deve ser o menor possível, sem contudo correr o risco de passar escória do distribuidor para o molde.

.

ABSTRACT

The increase of the production of steels through continuous casting machines requires long ladle sequences without interruption; if this condition is achieved it brings out stability and safeness and also reduction of operational cost. Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST) arrival at the hot rolled coil market is demanding flexibility to supply small tonnages of a variety of steel grades. Thus in order to accomplish this objective without increasing the operational costs it has become necessary to cast different grades of steel at the same sequential without tundish changes.

The objective of this project is to study the alternatives that would make possible the mixture of steels in the tundish but minimizing the losses due to downgrading the slabs. Both physical and mathematical modeling are to be used in order to evaluate the influence of variables such as: geometry of the tundish, flow obstacles, presence of turbulence inhibitors, depth of ladle valve, weight of steel in the tundish, stopper rod etc. It is intended to study the influence of these parameters on the mixing zone, both in a qualitative and quantitative way.

With a mathematical model for intermixing, it was possible to study continuous casting variables effects in length slabs mixing. The tundish weight was more important for minimum mixing. The tundish weight has to be the minimum possible, however without allow the pass of slag from tundish to mold.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Máquina desenvolvida por Henry Bessemer	4
Figura 3.2 – Evolução da participação de lingotamento contínuo na produção total de aço, conforme Valadares (2005)	6
Figura 3.3 – Tipos de máquinas de lingotamento contínuo, segundo Valadares (2005).	6
Figura 3.4 – Figura esquemática da Máquina de Lingotamento Contínuo	8
Figura 3.5 – Efeito da densidade de fluxo magnético na concentração relativa da mistura, conforme Tsukihashi e Li (2001)	18
Figura 3.6 – Figura esquemática da configuração de distribuidor YES em teste na MLC#2.	19
Figura 3.7 – Curva de concentração de C versus comprimento de placa, de uma mistura de aços e seu inverso, conforme Sylvestre e colaboradores (2003)	22
Figura 3.8 – Curvas de diferentes estratégias de reenchimento do distribuidor, segundo Mostert (1998)	23
Figura 3.9 – Desenho esquemático do distribuidor da Edgar Thomson Works, mostrando a localização dos dispositivos de fluxo, conforme Piccone, Sinha e Madden (2001)	25
Figura 3.10 – Comparação dos resultados dos dois métodos de adição de cobre, conforme Sinha e colaboradores (2002)	27
Figura 3.11 – Curva de Concentração de Mn e V versus tempo, segundo Yu, Dickinson e Skagen (2005)	29

Figura 3.12 – Comparação das concentrações com diferentes padrões de reenchimento, segundo Yu, Dickinson e Skagen (2005)	30
Figura 3.13 – Variação da velocidade de lingotamento, peso de aço no distribuidor e vazão de aço com o tempo para uma troca de panelas, conforme Huang e Thomas(1996)	32
Figura 3.14 – Representação esquemática do modelo de mistura no distribuidor, conforme Huang e Thomas (1996)	35
Figura 3.15 – Esquema mostrando as três regiões do submodelo de mistura no veio, conforme Huang e Thomas(1996)	43
Figura 3.16 – Variação da espessura da pele solidificada em função do tempo para diferentes condições de resfriamento secundário, conforme apresentado por Huang e Thomas(1996)	47
Figura 3.17 – Resultado Típico obtido pelo modelo desenvolvido por Huang e Thomas(1996)	48
Figura 3.18 – Comparação do resultado previsto pelo modelo para composição química na placa com os resultados práticos para uma troca de panelas na Armco – Huang e Thomas (1966)	49
Figura 4.1 – Foto do modelo experimental do distribuidor da CST	50
Figura 4.2 – Desenho esquemático do modelo físico do distribuidor da CST	52
Figura 4.3 – Curva de transição, na saída do distribuidor, considerando vazão de 8,68 t/min, razão de reenchimento 1,43 e nível mínimo de aço 22 ton.	53
Figura 4.4 – Perfil esquemático do composição na área de seção reta da placa, após início de transição	54

Figura 4.5 – Esquema para determinar variação de composição química do líquido na poça líquida.	56
Figura 4.6 – Distribuição de composição de pele em função da curva de transição no molde.	57
Figura 4.7 – Malha de integração correspondente a $\frac{1}{4}$ da seção reta da placa.	58
Figura 4.8 – Curva de transição no molde	58
Figura 4.9 – Figura esquemática do posicionamento das amostragens na seção transversal	59
Figura 4.10 – Figura esquemática do posicionamento das amostragens considerando seções transversais e longitudinais.	60
Figura 5.1 – Vazão de entrada de líquido no distribuidor, em função do tempo adimensionalizado (modelo)	62
Figura 5.2 – Curva de transição F vs t, veio 01	63
Figura 5.3 – Curva de transição F vs t, veio 02	63
Figura 5.4 – Gráfico de determinação da variável “C” do teste RS1210h4 (Q=8,81 ton/min, Q _r =13,07 ton/min, f=1,48 e N _{mín} = 15ton), veio 01.	70
Figura 5.5 – Gráfico de determinação da variável “C” do teste RS1210h4 (Q=8,81 ton/min, Q _r =13,07 ton/min, f=1,48 e N _{mín} = 15ton), veio 02.	71
Figura 5.6 – Gráfico de comparação dos valores de “C” médio calculado e experimental.	71
Figura 5.7 – Comparação entre valores calculados e experimentais.	82

Figura 5.8 – Gráfico de regressão linear para determinação do valor de “C” – Teste Rtt02q3 (veio 01)	82
Figura 5.9 – Gráfico de regressão linear para determinação do valor de “C” – Teste Rtt02q3 (veio 02)	83
Figura 5.10 – Gráfico comparativo dos valores experimentais e calculados de Tmin 0,02 (média veios 01 e 02)	95
Figura 5.11 – Gráfico comparativo dos valores experimentais e calculados de “C” (média veios 01 e 02)	96
Figura 5.12 – Gráfico comparativo dos valores experimentais e calculados de “C”, excluindo variável “h” (média veios 01 e 02)	96
Figura 5.13 – Gráfico comparativo dos valores experimentais de “C” para os testes realizados a quente e a frio.	97
Figura 5.14 – Gráfico comparativo dos valores experimentais de Tmín 0,02 para os testes realizados a quente e a frio.	97
Figura 5.15 – Análise da Influência do peso de aço no distribuidor no comprimento da mistura , curvas de distribuidor e molde	99
Figura 5.16 – Análise da Influência da taxa de reenchimento de aço no distribuidor no comprimento da mistura , curvas de distribuidor e molde	101
Figura 5.17 – Análise da Influência da taxa de extração de aço no distribuidor no comprimento da mistura , curvas de distribuidor e molde	103
Figura 5.18 – Análise da Influência da prática de “holding” no distribuidor no comprimento da mistura , curvas de distribuidor e molde	105

Figura 5.19 – Análise da Influência do gradiente de temperatura no comprimento da mistura , curvas de distribuidor e molde	106
Figura 5.20 – Comparação entre os resultados do modelo matemático e resultados experimentais – carbono	112
Figura 5.21 – Comparação entre os resultados do modelo matemático e resultados experimentais – Manganês	113
Figura 5.22 – Comparação entre os resultados do modelo matemático e resultados experimentais – Silício	113
Figura 5.23 – Comparação entre os resultados das análises dos três elementos da placa de mistura com o modelo – Superfície	114
Figura 5.24 – Comparação entre os resultados do modelo de acordo com a variação dos valores da constante de solidificação k	115

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1 – Principais vantagens e desvantagens para cada tipo de máquina	7
Tabela III.2 – Principais Métodos para Realizar Troca de Qualidade no Lingotamento	17
Tabela III.3 – Principais Métodos para Minimizar o Volume Gerado durante Troca de Qualidade no Lingotamento	20
Tabela IV.1 – Características físicas do distribuidor estudado	51
Tabela IV.2 – Resultado das simulações	52
Tabela V.1 – Dados Gerais do Modelo	64
Tabela V.2 – Dados Gerais da máquina industrial, critério de Froude	65
Tabela V.3 – Parâmetros operacionais, do distribuidor da MLC1 – CST, aplicados na realização dos testes (dados para modelo e protótipo).	67
Tabela V.4 – Algumas propriedades relevantes do aço e da água	68
Tabela V.5 – Resultados dos testes de transiente para determinação da variável “C” após análise gráfica (seqüência: vazão de 8t/min, nível mínimo de 15t, taxa de reenchimento de 1,5 e holding igual a zero)	72
Tabela V.6 – Resultados dos testes de transiente para determinação da variável “C” após análise gráfica (seqüência: vazão de 8t/min, nível mínimo de 22t, taxa de reenchimento de 1,5 e holding igual a zero)	72

Tabela V.7 – Resultados dos testes de transiente para determinação da variável “C” após análise gráfica (seqüência: vazão de 8t/min, nível mínimo de 15t, taxa de reenchimento de 2,0 e holding igual a zero)	73
Tabela V.8 – Resultados dos testes de transiente para determinação da variável “C” após análise gráfica (seqüência: vazão de 8t/min, nível mínimo de 22t, taxa de reenchimento de 2,0 e holding igual a zero)	73
Tabela V.9 – Resultados dos testes de transiente para determinação da variável “C” após análise gráfica (seqüência: vazão de 10t/min, nível mínimo de 15t, taxa de reenchimento de 1,5 e holding igual a zero)	74
Tabela V.10 – Resultados dos testes de transiente para determinação da variável “C” após análise gráfica (seqüência: vazão de 10t/min, nível mínimo de 22t, taxa de reenchimento de 1,5 e holding igual a zero)	74
Tabela V.11 – Resultados dos testes de transiente para determinação da variável “C” após análise gráfica (seqüência: vazão de 10t/min, nível mínimo de 15t, taxa de reenchimento de 2,0 e holding igual a zero)	75
Tabela V.12 – Resultados dos testes de transiente para determinação da variável “C” após análise gráfica (seqüência: vazão de 10t/min, nível mínimo de 22t, taxa de reenchimento de 2,0 e holding igual a zero)	75
Tabela V.13 – Resultados dos testes de transiente para determinação da variável “C” após análise gráfica (seqüência: vazão de 8t/min, nível mínimo de 15t, taxa de reenchimento de 1,5 e holding de 51,96s)	76
Tabela V.14 – Resultados dos testes de transiente para determinação da variável “C” após análise gráfica (seqüência: vazão de 8t/min, nível mínimo de 22t, taxa de reenchimento de 1,5 e holding de 51,96s)	76

Tabela V.15 – Resultados dos testes de transiente para determinação da variável “C” após análise gráfica (seqüência: vazão de 8t/min, nível mínimo de 15t, taxa de reenchimento de 2,0 e holding de 51,96s)	77
Tabela V.16 – Resultados dos testes de transiente para determinação da variável “C” após análise gráfica (seqüência: vazão de 8t/min, nível mínimo de 22t, taxa de reenchimento de 2,0 e holding de 51,96s)	77
Tabela V.17 – Resultados dos testes de transiente para determinação da variável “C” após análise gráfica (seqüência: vazão de 10t/min, nível mínimo de 15t, taxa de reenchimento de 1,5 e holding de 51,96s)	78
Tabela V.18 – Resultados dos testes de transiente para determinação da variável “C” após análise gráfica (seqüência: vazão de 10t/min, nível mínimo de 22t, taxa de reenchimento de 1,5 e holding de 51,96s)	78
Tabela V.19 – Resultados dos testes de transiente para determinação da variável “C” após análise gráfica (seqüência: vazão de 10t/min, nível mínimo de 15t, taxa de reenchimento de 2,0 e holding de 51,96s)	79
Tabela V.20 – Resultados dos testes de transiente para determinação da variável “C” após análise gráfica (seqüência: vazão de 10t/min, nível mínimo de 22t, taxa de reenchimento de 2,0 e holding de 51,96s)	79
Tabela V.21 – Resultados médios experimentais de $T_{mín}$ 0,02 (protótipo) e “C” (modelo) para suas respectivas condições operacionais	84
Tabela V.22 – Dados utilizados nas simulações para avaliar a influência do peso de aço no distribuidor no comprimento da placa de mistura	99
Tabela V.23 – Dados utilizados nas simulações para avaliar a influência da taxa de reenchimento de aço no distribuidor no comprimento da placa de mistura	101

Tabela V.24 – Dados utilizados nas simulações para avaliar a influência da taxa de extração de aço no distribuidor	102
Tabela V.25 – Dados utilizados nas simulações para avaliar a influência da prática de “holding” no distribuidor no comprimento da placa de mistura	104
Tabela V.26 – Dados utilizados nas simulações para avaliar a influência do gradiente de temperatura no comprimento da placa de mistura	106
Tabela V.27 – Composição Química das corridas da mistura	108
Tabela V.28 – Parâmetros do processo da Mistura	108
Tabela V.29 – Resultados de Análise Química e Concentração Normalizada (CN) da Placa de Mistura – Carbono	109
Tabela V.30 – Resultados de Análise Química e Concentração Normalizada (CN) da Placa de Mistura – Silício	110
Tabela V.31 – Resultados de Análise Química e Concentração Normalizada (CN) da Placa de Mistura – Manganês	111

1. INTRODUÇÃO

Devido à demanda de materiais para as mais rígidas aplicações o investimento na melhoria da qualidade tem aumentado cada vez mais, porém não esquecendo de seu impacto na produtividade e no custo de processo.

Neste contexto, o aumento da produtividade do processo de lingotamento contínuo muitas vezes requer longas seqüências de painéis, sem parar ou reiniciar o lingotamento.

Com a entrada da CST, a partir de agosto de 2002, no mercado de bobinas a quente houve um crescimento na demanda da produção de diversos novos tipos de aços, porém com um volume de produção muito reduzido quando comparado à produção de placas para venda direta. De modo a atender estes baixos volumes e com o intuito de reduzir o custo de fabricação faz-se necessário à realização de mistura de aços no mesmo distribuidor, visando não interromper o processo durante as trocas de painéis.

Para tanto, é necessário saber com precisão onde ocorre a região de mistura com o objetivo de minimizar as perdas, evitar enviar aos clientes placas fora da especificação requerida ou descartar placas consideradas boas. Neste sentido a construção de modelos capazes de prever o comprimento desta placa de transição se torna muito importante, para que a região de mistura seja apropriadamente identificada e destinada a um fim específico (down grade ou sucata).

Existem diversos procedimentos para lingotar diferentes tipos de aço em uma mesma seqüência. O método mais utilizado é efetuar a troca do distribuidor quando se muda o tipo de aço, o que gera uma região de placas de mistura somente no molde e implica em menor comprimento de placas de mistura. Porém, com esta prática, atender a demanda de pequenos lotes realizando apenas uma ou duas corridas em um distribuidor se torna uma prática de alto custo.

Também se pode utilizar a prática de realizar a mistura de aços no distribuidor e no molde. A primeira destas é a mais simples, por envolver apenas uma troca de painéis. Este método minimiza a perda de produtividade por não haver necessidade de reduzir a velocidade de

máquina, porém o volume de mistura a ser gerado seria muito grande. O segundo método compreenderia reduzir ao máximo o aço remanescente no distribuidor, gerando uma pequena perda de produtividade, porém reduzindo também a geração de placas a serem desclassificadas.

Estes diversos tipos de procedimento normalmente geram placas que serão sucatas ou sofrerão um “down grade”. Para minimizar o volume de placas de descarte ou de “down grade” torna-se necessário uma melhor compreensão dos fenômenos que ocorrem durante a mistura de diferentes tipos de aço no mesmo distribuidor e no molde, onde se completa a transição. Não se deve esquecer que existem limites operacionais para a redução do volume de aço no distribuidor. Este método será estudado para as condições da CST.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é utilizar técnicas de modelamento matemático, aplicadas ao processo de lingotamento contínuo para investigar o comportamento fluidodinâmico do aço líquido durante a troca de panelas no lingotamento contínuo, visando promover um decréscimo no comprimento das placas de mistura.

Para isso serão estudadas algumas variáveis operacionais que interferem na quantificação da mistura obtida, e suas influências no comprimento da placa de mistura. E serão estudadas as alternativas para viabilizar a mistura de aços no distribuidor minimizando as perdas por descartes ou “down grade” das placas produzidas.

Neste trabalho foi elaborado um modelo matemático, aplicado ao distribuidor e molde, para prever o comprimento da placa de mistura gerada durante uma troca de panelas de aço com composição química diferente no lingotamento contínuo.

Outro objetivo é a validação do modelo matemático através da amostragem em placas de mistura obtidas durante a prática operacional do lingotamento contínuo na Companhia Siderúrgica de Tubarão, avaliando determinadas condições de troca de qualidades.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 – Histórico do Lingotamento Contínuo

A concepção inicial do lingotamento contínuo de metais foi obtida na metade do século XIX. Devido as limitações de engenharia e qualidade dos materiais daquela época as idéias concebidas por G.E.Seller (1840), J. Laing (1834) e Henry Bessemer (1846), citados por Valadares (2005), somente puderam ser usadas no lingotamento de metais não ferrosos de baixo ponto de fusão. Mesmo assim o primeiro trabalho sobre o processo de lingotamento contínuo de aços foi patenteado por Henry Bessemer em 1865. Sua concepção é muito semelhante aos projetos utilizados hoje para realizar o lingotamento contínuo de tiras com rolos duplos, conforme ilustrado na figura 3.1.

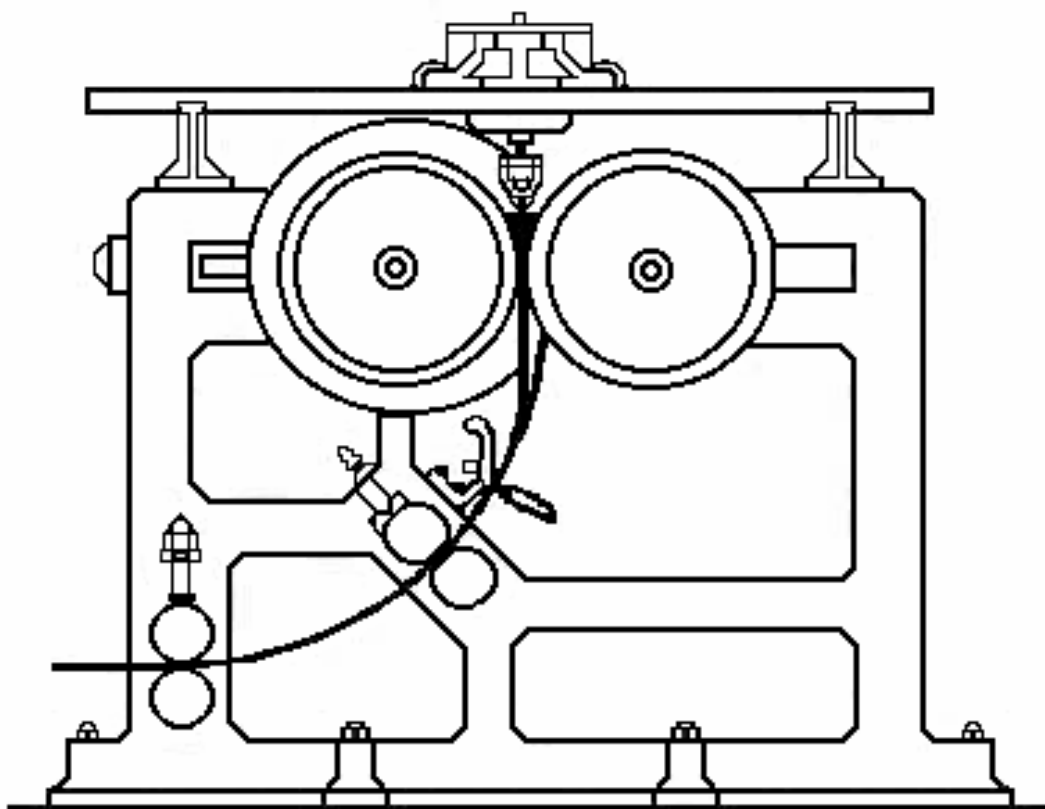


Figura 3.1 – Máquina desenvolvida por Henry Bessemer.

A primeira proposição para uma máquina de lingotamento contínuo, com projeto básico correspondente às atuais e modernas máquinas de lingotamento contínuo, foi formulada em 1887 na Alemanha por Dealen. O projeto incluía molde refrigerado à água aberto na parte superior e inferior, alimentado por um jato de metal líquido, uma zona de refrigeração secundária, barra falsa, rolos extratores e mecanismos para corte de produto.

Desde os primeiros desenvolvimentos foi destacada a necessidade de se produzir um movimento relativo entre o veio e as paredes do molde. Tentativas iniciais foram incluídas nas patentes do americano Laing e do sueco Pehson. Somente em 1933, Siegfried Junghans desenvolveu e patenteou o sistema de oscilação do molde que foi o ponto de partida para a larga aplicação industrial do lingotamento contínuo.

No Brasil o processo de lingotamento contínuo foi introduzido pela Riograndense, em 1960, com uma máquina de tarugos de dois veios, seguida pela Siderúrgica Dedini em 1968 com uma máquina de tarugo de três veios.

A partir de 1972 cresceu de forma acentuada o número de instalações de lingotamento contínuo de tarugos no Brasil e em 1976, na Usiminas, foi iniciada a produção de placas por lingotamento contínuo, com duas máquinas de dois veios. A seguir a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), Acesita, Cosipa e CST introduziram o lingotamento contínuo na linha de produção.

O grande desenvolvimento do lingotamento contínuo é consequência das inúmeras vantagens sobre o processamento convencional (lingote), principalmente ganho de rendimento, economia de energia e melhor qualidade do produto.

A figura 3.2, conforme Valadares (2005), mostra a evolução da participação do lingotamento contínuo nos últimos anos no Japão, União Européia e Estados Unidos. No Brasil também tem ocorrido um aumento rápido de 1997 a 1999, atingindo 91,9% em 2003.

Em 1998 com a entrada da segunda máquina, toda a produção da CST passou a ser via lingotamento contínuo.

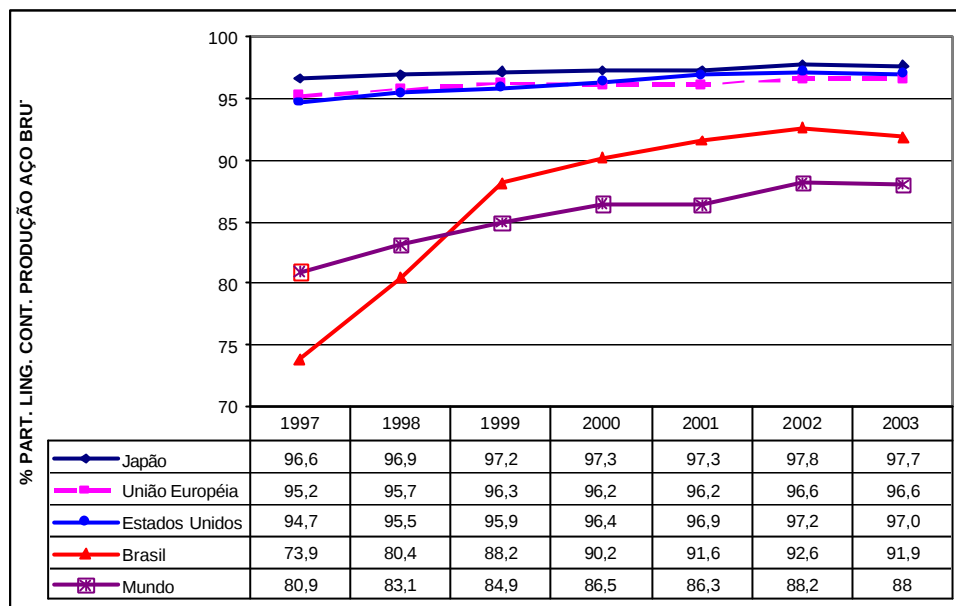


Figura 3.2: Evolução da participação do lingotamento contínuo na produção total de aço, conforme Valadares (2005)

3.2 – Tipos de Máquinas de Lingotamento Contínuo

De acordo com a filosofia de projetos as máquinas de lingotamento contínuo de placas podem ser classificadas de diversos tipos, conforme mostrado na figura 3.3.

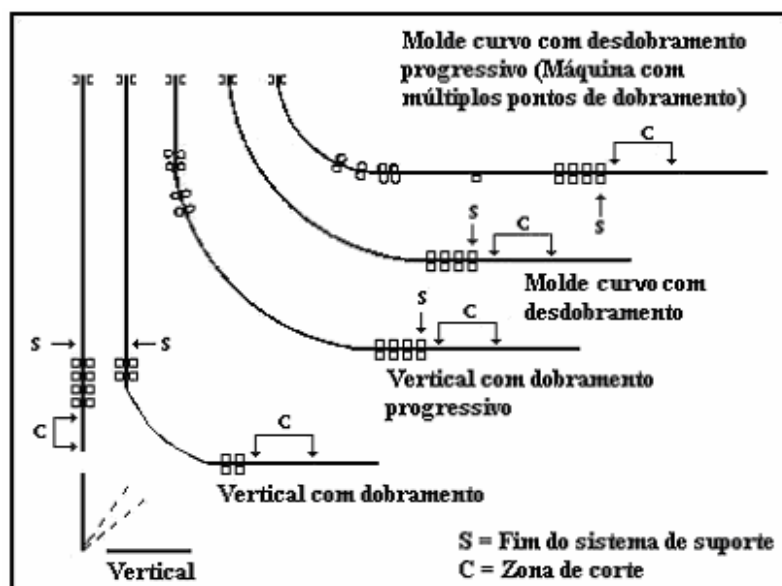


Figura 3.3: Tipos de Máquinas de Lingotamento Contínuo, segundo Valadares (2005)

Segundo Valadares, o tipo de máquina deve ser escolhido em função das características dos processos de aciaria disponíveis e o nível de qualidade do produto requerida. A tabela III.1 mostra as principais vantagens e desvantagens dos tipos de máquinas.

Tabela III.1: Principais vantagens e desvantagens para cada tipo de máquina.

MÁQUINA	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Vertical Simples	- Não há deformação de encurvamento e desencurvamento; - Facilidade para flutuar inclusões de óxidos.	- Necessário grande espaço físico - Grande pressão ferrostática; - Alto custo de equipamentos auxiliares; - Grande risco de abaulamento de placas entre rolos; - Velocidade limitada.
Vertical Curva - molde reto e desdobramento progressivo	- Facilidade para flutuar inclusões de óxidos e bolhas de gases.	- Deformação da pele solidificada no início de lingotamento; - Raio de curvatura mínimo, normalmente maior que máquina curva.
Curva – molde curvo e desdobramento progressivo	- Deformação de desencurvamento se dá com pele grossa; - Baixa altura de instalação; - Baixa pressão ferrostática; - Sistema de extração e remoção de placas simples	- Aprisionamento de inclusões e bolhas na sub-superfície; - Geração de trincas transversais devido ao desencurvamento.

Cada tipo de máquina é utilizado para a produção de determinados tipos de aços, sendo que as mais utilizadas atualmente são as verticais curvas por promoverem ganhos de limpidez no produto final. As máquinas curvas são normalmente mais utilizadas para a produção de aços médio e alto carbono, pois estes aços apresentam alta tendência de qualidade superficial nas

máquinas verticais curvas.

3.3 – Descrição geral do Processo de Lingotamento Contínuo

Desde o instante que o aço, ao ser vazado dos fornos da Aciaria, entra em contato com a panela, processam-se trocas térmicas com os refratários e ambiente provocando estratificação de temperatura no líquido, que se acentua com o transporte até a máquina de lingotamento contínuo. Estas diferenciações são prejudiciais à obtenção de um produto com características mecânicas e metalúrgicas uniformes.

Para uma homogeneização e controle de temperatura e composição química processam-se tratamentos em estações de refino secundário e destas a panela deve ser transferida e posicionada na torre giratória, com composição, temperatura e tempo pré-determinados para início do lingotamento.

A figura 3.4 mostra um desenho ilustrativo de uma máquina de lingotamento contínuo.

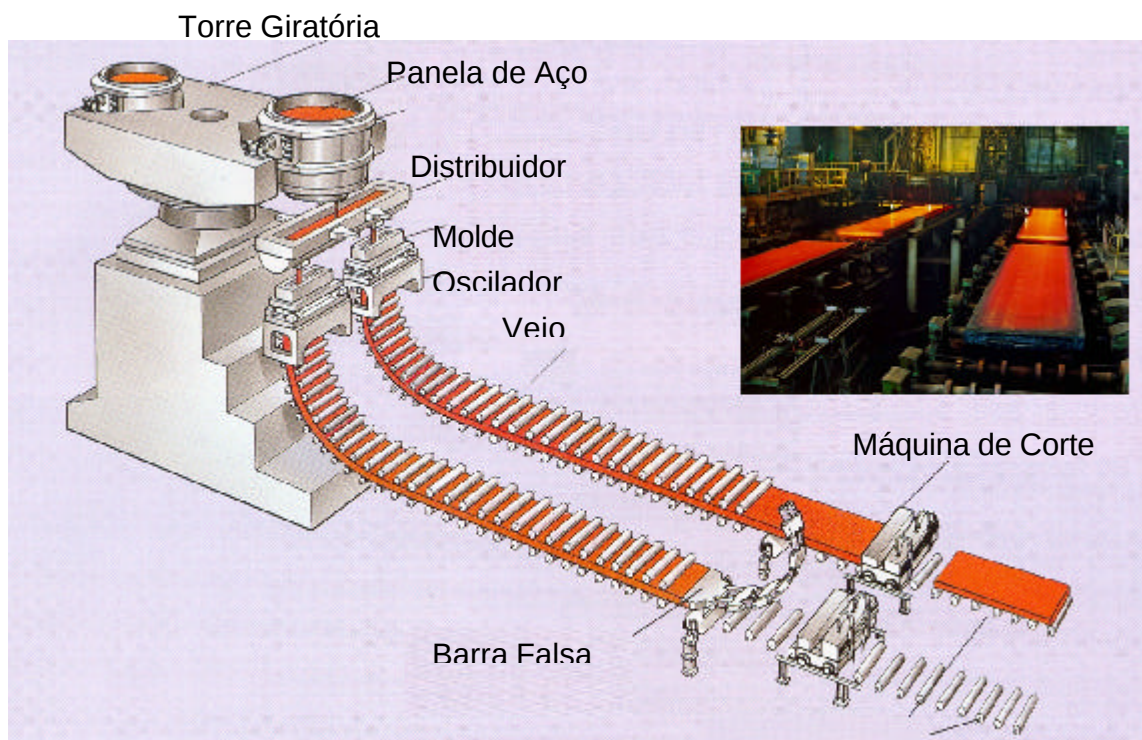


Figura 3.4: Figura Ilustrativa da Máquina de Lingotamento Contínuo

Da panela o metal é vazado ao distribuidor, que tem por finalidade principal regular o fluxo do aço líquido para um ou mais molde. Seu principal objetivo, além de distribuir o aço para molde, é servir como um reservatório pulmão durante a troca de panelas, mantendo assim a continuidade do lingotamento contínuo.

O distribuidor também é utilizado para a realização de ajuste na composição química, bem como para promover a remoção de inclusões. Para se conseguir melhorar a limpidez do aço no distribuidor é necessário direcionar corretamente o fluxo do aço, de forma a maximizar a flotação das inclusões, minimizar o volume de aço estagnado, volume morto, e eliminar a formação de vórtex.

Quando o metal atinge uma altura pré-determinada abre-se a válvula do distribuidor (válvula gaveta ou tampão). O aço rapidamente solidifica ao entrar em contato com a barra falsa que é extraída, a uma taxa crescente, até atingir-se um estado estacionário de velocidade, definido em função da produtividade e qualidade requeridas.

O molde é responsável pelo início da solidificação do aço, envolvendo a formação da pele sólida. Impõe-se um fluxo térmico pelas paredes do molde, que são placas de ligas de cobre refrigeradas à água, onde se processa o resfriamento primário, com o objetivo de formar uma camada solidificada com uma espessura tal que a torne resistente para suportar a pressão ferrostática do líquido e as solicitações mecânicas externas. Durante todo o processo o molde está sujeito a um movimento de oscilação vertical que aumenta a possibilidade de fechamento de pequenas trincas que podem originar em seu interior. As características do molde (tipo de material e dimensões), as características do pó fluxante, a profundidade e geometria da válvula submersa, além dos parâmetros de oscilação (frequência e amplitude) e a intensidade da agitação eletromagnética são os principais parâmetros que devem ser controlados no molde.

Ao sair do molde, a placa apresenta cerca de 15 a 25mm de pele sólida, dependendo da velocidade de lingotamento, temperatura de alimentação do aço e vazão de água no molde. Essa pele solidificada é que sustenta o interior ainda líquido e permite a extração da placa. Logo que deixa o molde, a placa é guiada por rolos e o resfriamento se efetua por contato direto com a água

(ou água e ar) de uma bateria de sprays. Estas regiões são denominadas resfriamento secundário. A espessura da pele solidificada vai aumentando ao longo do veio, que é envolvido por rolos guias montados em segmentos.

O resfriamento por sprays deve ser realizado de tal modo que a superfície seja resfriada de forma contínua e tenha uma temperatura mais constante possível em toda a superfície de uma seção transversal da placa. Para facilitar o controle de extração de calor, esta região é dividida em diversas zonas.

3.4 – Escoamento de Aço Líquido no Lingotamento Contínuo

Com o crescimento da aplicação do processo de lingotamento contínuo, estudos mais aprofundados começaram a ser desenvolvidos visando principalmente o aumento de produtividade e a melhoria da qualidade do produto. O modelamento matemático e físico do processo de lingotamento contínuo vem se revelando cada vez mais uma ferramenta indispensável, não só no sentido de melhor conhecimento quantitativo dos fenômenos envolvidos, como também no desenvolvimento e aprimoramento de instalações industriais. Estes estudos visam o melhor entendimento dos fenômenos associados ao escoamento e a solidificação do aço no processo.

De um modo geral, antes da consolidação quase que total do processo de lingotamento contínuo, somente dois parâmetros eram considerados para caracterizar a condição do aço durante o refino e posterior lingotamento. Esses dois parâmetros eram a temperatura e composição química. Entretanto, recentes inovações nas práticas de tratamento de panela e particularmente técnicas de lingotamento contínuo, requerem um terceiro parâmetro que juntamente com os dois anteriores, passaram a caracterizar completamente o aço em qualquer posição na sequência de processamento. Este terceiro parâmetro é o escoamento. Hoje já são bem conhecidas as interações entre estes três parâmetros e o que eles representam em termos de qualidade e produtividade em uma aciaria moderna. Temperatura e composição química influenciam grandemente a físico-química do processo de fabricação de aço. A condição de escoamento afetará as perdas de calor, a reoxidação do aço e a flutuabilidade das inclusões.

O distribuidor, na operação do lingotamento contínuo, tinha basicamente a função de ser um reservatório de aço e este conceito tem mudado consideravelmente. Hoje o distribuidor é visto como um reator que afeta a flutuação e a separação das inclusões. Da mesma forma, os conceitos da utilização de proteção de jato, válvula submersa e molde tiveram uma grande evolução. Hoje, a utilização destes equipamentos aliados as técnicas do emprego do argônio, estão voltadas basicamente para obtenção de aços com baixos níveis de inclusões. Atenção especial tem sido dada às condições escoamento do aço no distribuidor, no sistema válvula submersa/ molde e no veio devido à influência deste no nível de limpidez obtido no produto.

O escoamento é fortemente influenciado pela geometria dos equipamentos, pela presença dos defletores de fluxo, pela presença de gases e pelas condições operacionais de lingotamento. O escoamento do aço líquido no distribuidor e no molde tem efeito significativo na formação da mistura de qualidades no lingotamento contínuo. Sabendo-se como se comportam as linhas de fluxo dos dois sistemas, pode-se prever regiões de baixa troca térmica, regiões estagnadas ou outras de excessiva turbulência.

O primeiro reator que deve ser avaliado no processo de lingotamento contínuo é o distribuidor. Segundo Andrade, Ribeiro e Santos (1993), as principais funções do distribuidor são além de distribuir o aço proveniente da panela para os moldes, atuar como reservatório de aço durante troca de panelas, serve também como um reator capaz de diversas funções de refino, principalmente relacionados à remoção de inclusões. Dessa forma, muita importância tem sido dada ao projeto do distribuidor, principalmente ao que se refere ao posicionamento de barragens, de modo a originar um escoamento do aço favorável à flutuação de inclusões.

O escoamento do aço líquido no distribuidor passou a receber maior atenção devido a busca constante de um aço cada vez mais limpo e de melhor qualidade. O distribuidor passou a possuir uma nova função, que é a de favorecer a flotação das inclusões do aço para a escória, evitando seu arraste para o interior do veio. A eficiência dessa remoção de inclusões depende das condições cinéticas e termodinâmicas presentes no distribuidor. Portanto, uma análise do fluxo de aço entre panela e molde é importante e têm sido estudadas através de modelamento matemático, técnicas de traçadores radioativos e técnicas de modelamento físico. As modelagens física e

matemática para avaliar as condições de escoamento no distribuidor têm sido bastante usadas pois possibilitam determinar as linhas de fluxo de aço, e avaliar o efeito de mudanças na configuração do distribuidor sobre a distribuição dos tempos de residência, de modo a minimizar as regiões de fluxo estagnado. Regiões que apresentam fluxo estagnado são aquelas em que o elemento do fluido permanece no reator por um tempo muito maior que o tempo de residência médio. Estas regiões afetam negativamente a eficiência do distribuidor em termos de flotação de inclusões.

A formação de regiões estagnadas no distribuidor provoca um caminho preferencial para o escoamento do aço, contribuindo para diminuir o volume útil do distribuidor. Portanto, o projeto de um distribuidor deve buscar maximizar o tempo de residência médio do aço, minimizar volume morto e minimizar a turbulência na camada de escória.

Andrade, Ribeiro e Santos (1993) realizaram experimentos variando as posições e dimensões das barragens, visando obter condições mais favoráveis para flutuação das inclusões, procurando maximizar o tempo médio de residência e minimizar o volume estagnado. Os experimentos demonstraram que, na entrada do distribuidor, devido à elevada energia cinética do fluido, as forças de inércia predominam sobre as forças viscosas, ocorrendo grande misturamento e difusão turbulenta das partículas, a região do distribuidor assim caracterizada, é denominada região de mistura, e o volume compreendido nesta região constitui-se no volume misturado. Quando o escoamento se torna suave, as forças viscosas predominam sobre as forças de inércia e as partículas se movimentam paralelamente sem difusão axial e longitudinal, constituindo uma região de escoamento chamada região de volume pistonado. Em algumas regiões do distribuidor, o movimento das partículas é muito lento, está é a região estagnada ou volume morto. Para facilitar a remoção de inclusões o projeto do distribuidor deve ser otimizado para aumentar as parcelas das regiões de volume pistonado e volume de mistura e minimizar a região de volume estagnado. Dentre os diversos experimentos apresentados pelos autores, o volume de mistura predomina dentro do distribuidor.

Segundo Bianchi (1992), a remoção das partículas transportadas através do distribuidor pelo escoamento do metal líquido, depende diretamente da distribuição do campo de velocidades.

Portanto, uma descrição detalhada do comportamento hidrodinâmico do escoamento é fundamental para um ótimo projeto de distribuidor para o processo de lingotamento contínuo. A presença de barreiras em um distribuidor aumenta a trajetória percorrida pelas partículas não metálicas, facilitando sua separação do metal, por outro lado, as barreiras criam regiões de fluxo estagnado no distribuidor, reduzindo seu volume de trabalho. A presença de diques e barragens afetam o escoamento, reduzindo a intensidade da velocidade e aumentando o tempo de residência médio das partículas.

Silva e colaboradores (2003) utilizaram modelo físico do distribuidor como ferramenta para conhecer o padrão de fluxo no distribuidor e por consequência a influência de vários parâmetros de modo a resultar no maior grau de flotação de inclusões e menor geração de “intermix”. Foram realizadas simulações tanto no regime permanente, condição normal de lingotamento, quanto no regime transiente, simulando os momentos de troca de painéis, pois a melhor combinação relativa ao regime permanente não se mantém necessariamente a mesma quando se analisa as condições específicas de transiência devido à troca de painéis. Os testes em regime permanente envolveram combinações diversas das variáveis de nível de aço no distribuidor, profundidade de imersão de válvula longa, taxa de lingotamento e presença de modificadores de fluxo. Os testes em regime transiente simularam ainda o volume de aço no distribuidor no momento de abertura da nova panela e a taxa de reenchimento do distribuidor. A comparação dos resultados mostraram que para a condição de regime transiente os tempos mínimos de residência são significativamente menores que em condições de regime permanente, o que ressalta a importância de evitar o jato aberto durante as trocas de painéis. Os experimentos em regime permanente superestimam a projeção de intermix a ser gerado, isto devido a produção de intermix ser fortemente dependente do volume de trabalho e/ou volume mínimo alcançado durante troca de painéis.

Furtado (1994) utilizou modelamento matemático tridimensional para conhecer os campos de velocidade de distribuidores com diferentes configurações, barragem duplas e barragens quádruplas, com o objetivo de avaliar o escoamento do aço no distribuidor nas duas diferentes configurações. Através do conhecimento dos campos de velocidade, é possível conhecer o tempo médio de residência. Para validar o modelo matemático foram realizados testes em escala industrial utilizando cobre como elemento traçador, e retiradas amostras de aço líquido na saída

do distribuidor. Os tempos médios de residência obtidos numericamente apresentaram mesma tendência dos tempos experimentais, configuração de barragens quádruplas apresentando maior valor que barragens duplas. Furtado (1994) observou também que a configuração de barragens quádruplas proporcionou uma maior mistura do distribuidor, o que se é desejado quando se objetiva a coalescência das inclusões. Entretanto uma rápida aparição do traçador indica a existência de um curto circuito o que não é desejado para flotação de inclusões.

Costa e colaboradores (2003) e Castro e Tavares (1999) desenvolveram modelos matemáticos para simulação do escoamento tridimensional turbulento do aço líquido com a finalidade de avaliar a influência da alteração do projeto do distribuidor no perfil de escoamento do aço. Costa e colaboradores (2003) desenvolveram o modelo utilizando ferramentas do software ANSYS/FLOTRAN e sua validação foi realizada por meio de experiências em modelo físico. Os resultados mostraram a influência dos dispositivos controladores de fluxo no tempo de residência médio, tempo de residência mínimo (curto circuito), fração de volume pistonado, fração de volume morto e fração de volume com mistura perfeita.

Castro e Tavares (1999) desenvolveram o modelo utilizando o programa METFLO, onde além de simularem as condições de escoamento turbulento, simularam também a transferência de calor no distribuidor. Neste estudo foram avaliados o tempo de residência do metal no distribuidor e o efeito dos dispositivos controladores de fluxo. Foram realizados testes com quatro configurações diferentes de modificadores de fluxo e levantados os perfis de velocidade para cada configuração. De posse dos perfis de velocidade pode-se fazer previsão das curvas de distribuição de tempo de residência (curvas DTR). Os resultados evidenciaram a importância dos reguladores de fluxo na maior eficiência de remoção de inclusões.

O escoamento do aço líquido no molde é determinado principalmente pela configuração da válvula submersa, dimensões do produto e velocidade de lingotamento.

Thomas e Vanka (1999) utilizaram o programa CFX para conhecer os campos de velocidade no interior do molde e utilizaram modelo físico em água para validar os resultados apresentados pelo CFX. De posse do modelo foi possível verificar a influência de alguns parâmetros de processo:

quantidade de argônio injetada e velocidade de lingotamento no perfil de fluxo de aço dentro do molde.

De acordo com Reis e colaboradores (2001) a qualidade do aço produzido no lingotamento contínuo é bastante afetada pelas características de escoamento do aço no interior do molde, para conhecer tais características, os autores desenvolveram um modelo numérico do escoamento turbulento, bifásico em regime permanente através do conjunto de válvula submersa e molde. Foi utilizado o pacote de volumes finitos do programa CFX.

Os efeitos da vazão de argônio, velocidade de lingotamento e tamanho do molde foram simuladas parametricamente para uma configuração geométrica específica de válvula submersa. Parâmetros como a máxima velocidade superficial, máxima profundidade de penetração de argônio e máxima energia cinética turbulenta foram analisadas, tais variáveis podem ser diretamente relacionadas à qualidade obtida no aço lingotado.

Conhecendo as características do escoamento no distribuidor e molde, torna-se possível atuar para minimizar o volume de mistura de aços durante a troca de qualidades no lingotamento contínuo.

3.5 – Mistura de Aço no Lingotamento Contínuo

Ao longo dos anos, o crescente desenvolvimento do processo de lingotamento contínuo aliado à necessidade de maior produtividade tornou necessária a utilização de maior seqüencial de lingotamento; Ao mesmo tempo, também foi crescente a demanda por diferentes materiais com um menor volume de produção. Para atender as demandas requeridas, mantendo-se a produtividade, se faz necessária a mistura de diferentes tipos de aço no mesmo distribuidor, gerando então placas de composição química variável ao longo das mesmas, chamadas placas de mistura. Produtores de aço precisam conhecer exatamente onde a região mista ocorre, com o objetivo de promover um descarte mínimo e, ao mesmo tempo, conseguir atender os limites de especificação química dos clientes. Desta forma algumas condições de lingotamento podem ser otimizadas para minimizar o custo associado à mistura.

3.5.1 – Métodos para realizar trocas de qualidade no lingotamento Contínuo.

Huang e Thomas (1996) citam que existem vários meios para evitar/ minimizar a região de mistura gerada. O primeiro meio citado, operacionalmente mais simples, é lingotar os diferentes tipos de aço como sequência simples, ou seja, executando apenas uma simples troca de panelas. Este método evita as perdas de produtividade, porém gera o maior volume de mistura.

A alternativa mais extrema é o encerramento da sequência quando o primeiro grau terminar e produzir um novo grau em uma nova sequência. Desta forma se evita a geração de placas de mistura, porém, aumenta-se a perda de produtividade devido ao tempo gasto para reiniciar o lingotamento, ao mesmo tempo que provoca a perda de rendimento devido a problemas de qualidade relacionados ao fim e início de lingotamento.

Outro método é a troca de distribuidor, este minimiza a perda de produtividade, pois não requer parar a máquina de lingotamento contínuo e evita a mistura dentro do distribuidor; A mistura ocorre somente no interior do molde, porém ainda existe a perda de rendimento devido ao aço remanescente no distribuidor, além do que limita-se a vida média do distribuidor. Consequentemente o benefício depende da quantidade de mistura a ser evitada.

Para Yeh e colaboradores (1993) o método de realizar a troca de qualidades no lingotamento contínuo é a realização de mistura de aços no mesmo distribuidor com otimização. De acordo com os autores as variáveis que mais influenciam no volume de mistura gerada, são, a velocidade de lingotamento e nível mínimo de aço no distribuidor.

A tabela III.2 mostra de forma resumida os principais métodos para realização de troca de qualidades num lingotamento contínuo, apresentando as principais vantagens e desvantagens apresentadas pelos autores.

Tabela III.2: Principais Métodos para Realizar Troca de Qualidade no Lingotamento.

MÉTODOS	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Encerramento de Sequência	- Não gera placa de mistura	- Elevada perda de Produtividade - Maior geração de placas Críticas
Troca de Distribuidor	- Baixa Perda de Produtividade - Evita Mistura no Distribuidor	- Perda de rendimento devido ao aço remanescente no distribuidor - Elevado custo com refratários
Mistura de Aços – sem otimização	- Não gera perda de produtividade - Não impacta no custo de refratários	- Geração de grande volume de aço misturado
Mistura de Aços – com otimização	- Baixa perda de produtividade - Não impacta no custo de refratários	- Geração de pequeno volume de placas de mistura.

3.5.2 – Métodos para minimizar a região de mistura de aços.

Para Huang e Thomas (1996) o melhor método citado para minimizar a região de mistura é a inserção de placa separadora no molde. Este método é capaz de minimizar ao máximo a mistura no interior do molde. Entretanto a inserção física da placa separadora requer redução na velocidade de lingotamento ou até mesmo “parar” o veio, o que implica em risco de abaulamento excessivo e trincas nas placas, risco de rompimento de pele (*breakout*), e até mesmo dano à máquina de lingotamento, além de que, a placa separadora pode ser de alto custo.

Rasmussen(1996) compara a utilização de placa separadora (“*grade separator*”) com a utilização de inibidor de turbulência. O primeiro traz ganhos no comprimento da placa de mistura, porém ocasiona perda de produtividade, devido à necessidade de redução da velocidade de lingotamento para a inserção da placa separadora. Também ocasiona perda de qualidade da placa, pois a região de mistura (região com o separador) é considerada como sucata. Já no caso da utilização do turbostop, o comprimento da região de mistura encontrado foi similar ao comprimento descartado quando da utilização do separador, porém com ganhos quanto à produtividade da máquina e à

qualidade das placas, as quais podem ser aproveitadas para uma qualidade inferior à primeira qualidade, sem gerar placa sucatada.

Tsukihashi e Li (2001) mostram o efeito do freio eletromagnético sobre o fluxo de aço no molde e sua influencia direta no comprimento das placas de mistura. A aplicação do campo eletromagnético muda significativamente o campo de velocidades no molde. Decresce a profundidade de imersão do jato de aço aumenta a fração de fluxo *piston* no molde. As distribuições de concentração são as mesmas quando são aplicadas densidades de fluxo magnético acima de 0,3 T, conforme figura 3.5.

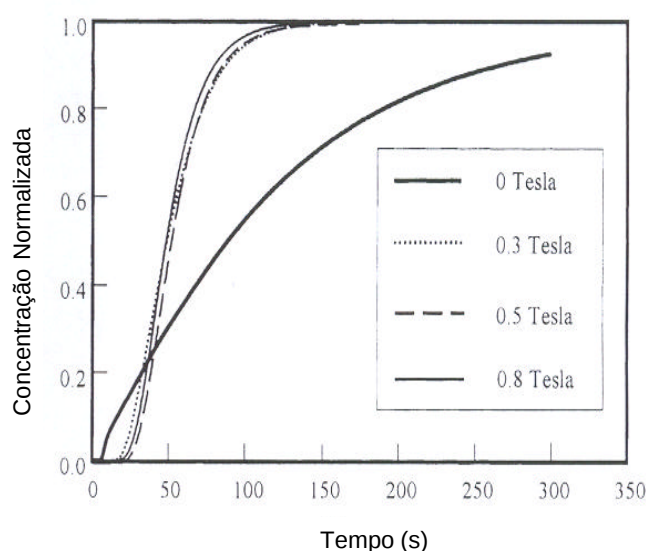


Figura 3.5 – Efeito da densidade de fluxo magnético na concentração relativa da mistura, conforme Tsukihashi e Li (2001)

De acordo com as experiências o comprimento das placas de mistura foi reduzido em 50% com aplicação de campo eletromagnético estático de 0,5 T.

Estudos recentes realizados na CST comparam o distribuidor utilizado na MLC#2 da CST com a configuração de diques e barreiras atual com uma nova configuração denominada YES (Yield Enhancement System), a qual consiste da utilização de um inibidor de turbulência associado à um aumento do fundo do distribuidor e utilização de barreiras, conforme demonstrado na figura 3.6.

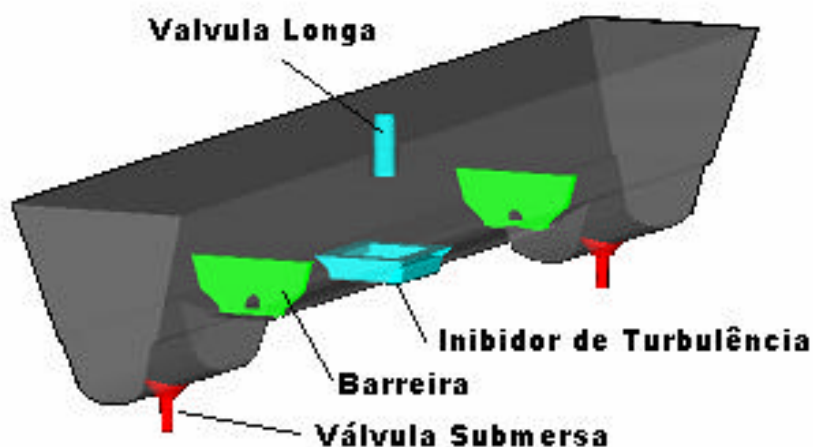


Figura 3.6 – Figura esquemática da configuração de distribuidor YES em teste na MLC#2.

O objetivo inicial dos testes é aumentar o rendimento de lingotamento pela redução do volume de aço remanescente no distribuidor nos momentos de troca de distribuidores, porém outras variáveis foram avaliadas, entre elas o grau de misturamento do distribuidor. Nos testes foram comparados as frações dos volumes em piston, volume de mistura perfeita e volume morto da configuração atual da CST com a configuração YES. Os resultados apresentaram uma menor fração de volume morto, 12,6% (YES) contra 15,3% (diques e barreiras), e por consequência um menor grau de misturamento.

A tabela III.3 mostra de forma resumida os principais métodos para minimizar os volumes de mistura gerada no caso de troca de qualidade no mesmo distribuidor, apresentando os principais objetivos e resultados alcançados pelos autores.

Tabela III.3: Principais Métodos para Minimizar o Volume de Mistura Gerado durante a Troca de Qualidade no Lingotamento.

MÉTODOS	OBJETIVOS	RESULTADOS ALCANÇADOS
Nível de aço no distribuidor e taxa de reenchimento	- Minimizar Mistura no Distribuidor	Quanto menor o volume de aço no distribuidor e maior a taxa de reenchimento menor o volume de mistura
Modificadores de Fluxo no distribuidor	- Minimizar a fração de volume morto e aumentar a fração de volume misto e principalmente em piston.	Diversos modificadores de fluxo são citados (baffles, turbostop, dique, barreira), mas cada distribuidor deve ser tratado independente de outro, visando não só a minimização da mistura, mas também a limpidez do aço.
Utilização de placa separadora	- Evitar a mistura no interior do molde.	Minimiza a região de mistura, mas também associa perda de produtividade, pois necessita “parar” o veio para inserção da placa, e risco de ocorrência de rompimento de pele (breakout). Impossibilidade de aproveitamento (sucata).
Utilização de Freio Eletro-magnético	- Frear o fluxo de aço para o interior do molde. Minimizar mistura no molde	A profundidade de imersão é suprimida e o volume de mistura gerado é cerca de 50% a menos que a condição normal.

3.5.3 – Modelos Matemáticos aplicados a mistura de Aços.

Diversos modelos matemáticos têm sido aplicados para descrever a transição de aços no processo de lingotamento contínuo, nos últimos anos. Todos destacam a importância da aplicação destes modelos na operação industrial, uma vez que possibilitam maior confiabilidade e flexibilidade na definição do comprimento da placa de mistura. Placas de mistura precisam ser desclassificadas, pois apresentam composição química variável ao longo das mesmas, composição esta que é

intermediária entre a corrida anterior e a posterior.

Zimmerman e Schmidt (2003) desenvolveram um modelo dinâmico de mistura baseado em conceitos de análise contínua do sistema de fluxo de aço. O modelo consiste de dois sub-modelos de mistura, independentes e em série, um para a mistura de aço no distribuidor e outro para a piscina líquida no veio. Um modelo de solidificação da pele de aço é utilizado para calcular a composição da placa.

O modelo é considerado dinâmico, pois é capaz de calcular o perfil de transição de composição química repetidamente durante sucessivos intervalos de tempo e capaz de ajustar cada interação de acordo com qualquer mudança nos parâmetros de lingotamento, tais como, nível de aço, taxa de re-enchimento do distribuidor, velocidade de lingotamento e largura do molde.

Para validar o modelo proposto por Zimmerman e Schmidt (2003), foram realizados testes na planta industrial (Burns Harbor Caster nº2) onde foram retiradas amostras longitudinais de 2 placas da região de mistura; as amostras foram retiradas em intervalos de um metro no centro e na face da placa. Os resultados das análises foram inseridos num modelo “off-line” e plotados junto com as curvas de transição calculadas. Após validação do modelo, um modelo “on-line” passou a ser utilizado e está em funcionamento hoje em dia.

Silva e colaboradores (2001) citam a importância de estudar o fluxo de aço no distribuidor para conhecer o grau de misturamento de diferentes tipos de aço e sua implicação no volume final de descarte. Em períodos de trocas de panela, caracterizados como períodos de transiência, os principais fatores relacionados com o volume de descarte gerado são volume de aço no distribuidor durante o re-enchimento com o aço “novo”, taxa de re-enchimento, taxa de lingotamento e configuração dos dispositivos de controle de fluxo.

Sylvestre e colaboradores (2001) utilizaram um modelo físico em escala 1:3, construído pela Siderar, para simular o efeito do inibidor de turbulência na mistura ocorrida no distribuidor, durante a troca de qualidades no lingotamento contínuo. Foram realizadas diversas simulações, utilizando diferentes velocidades de lingotamento, diferentes níveis de água no distribuidor e

distribuidor dotado de inibidor de turbulência e sem inibidor. A simulação na qual o nível de água era o mais baixo e o distribuidor possuía inibidor de turbulência resultou no menor comprimento de placa de mistura obtido. Sylvestre e colaboradores (2003) realizaram testes industriais para verificar resultados do modelamento físico. Constatou-se que a menor quantidade de região de mistura é obtida quando se passa de um aço com faixa de composição mais restrita para um outro com faixa mais ampla, conforme pode ser visto na Figura 3.7.

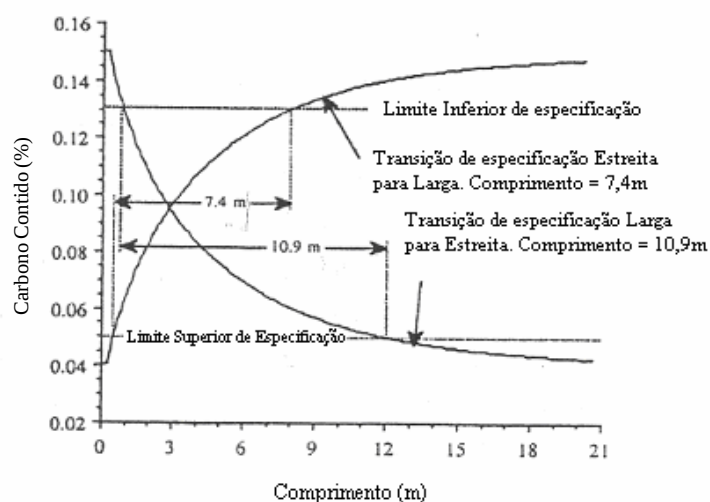


Figura 3.7 – Curva de Concentração de C versus comprimento de placa, de uma mistura de aços e seu inverso, conforme Sylvestre e colaboradores (2003)

Yeh e colaboradores (1993) desenvolveram um modelo tridimensional (empírico) o qual é capaz de analisar os comportamentos do fluxo de aço e transferência de massa nos distribuidor durante o período de transição na troca de panela, com o objetivo de prever o comprimento da placa de mistura. Segundo eles, as variáveis que mais influenciam a variação da composição e, conseqüentemente, o comprimento de placa de mistura durante a troca de painéis com qualidades distintas, são a velocidade de lingotamento e nível atingido pelo aço líquido, no interior do distribuidor antes do início de vazamento da panela subsequente. De acordo com os autores, o tempo de misturamento é reduzido com o aumento da velocidade de lingotamento e com a redução do nível mínimo, o que apresenta um efeito significativo no comprimento da placa de mistura.

Mostert e colaboradores (1998) citam a vantagens de desenvolver um modelo on-line pois devido à alta precisão e flexibilidade, mudanças nos parâmetros de lingotamento, tais como, velocidade de lingotamento ou nível de aço no distribuidor, planejadas ou não, podem ser facilmente consideradas. Além do mais, quando estratégias de reenchimento mudam, o modelo não necessita de ser reformulado. Na figura 3.8, é possível identificar algumas destas estratégias de reenchimento, as quais em algum momento podem ser utilizadas na planta industrial. Citam várias razões para reencher o distribuidor o mais rápido possível.

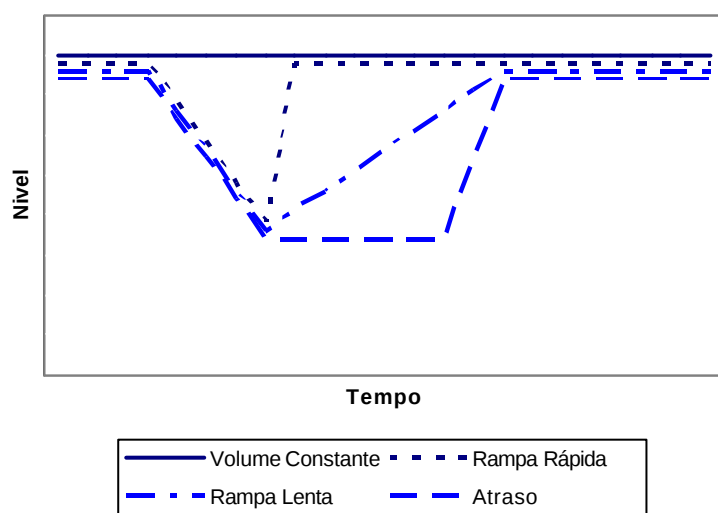


Figura 3.8– Curva de diferentes estratégias de reenchimento do distribuidor, segundo Mostert (1998)

Outra vantagem do modelo on-line, de acordo com Mostert e colaboradores (1998) é o tempo de resposta do modelo, o qual é em tempo real. Simulações computacionais elaboradas não são úteis neste aspecto devido ao longo tempo de resposta, enquanto modelos estatísticos são considerados inflexíveis.

Os autores citam ainda que, o modelo desenvolvido (utilizado na planta da antiga Hoogovens) segue cinco princípios conhecidos, os quais podem ser aplicados para qualquer condição de lingotamento contínuo e a qualquer tipo de aço. São eles:

- O único processo que contribui significativamente para a difusão é a turbulência. Difusão molecular não é importante;

- A concentração de entrada durante a troca de qualidade no lingotamento muda abruptamente no momento de abertura da nova panela;
- A primeira porção de aço da nova panela aparece um certo tempo após a abertura da panela;
- O aço mistura relativamente bem no distribuidor;
- No veio alguma mistura ocorre.

Devido a contribuição da difusão turbulenta ser mais importante que a difusão molecular, todas as espécies químicas irão demonstrar comportamento similar, logo é possível descrever o processo de mistura a partir da concentração normalizada.

Para o lingotamento de placas em dois veios, 8 sinais são necessários para permitir a utilização do modelo on-line em tempo real: abertura da panela, volume de aço no distribuidor e para cada veio, largura, espessura e velocidade de lingotamento.

Goldschmit e Ferro (2000) desenvolveram um modelo tridimensional baseado na equação Navier-Stokes (regime turbulento), e utilizaram equações de convecção/ difusão turbulenta para calibrar o mesmo. Um importante ponto a ser considerado é que, sendo o fluxo altamente turbulento, a difusividade turbulenta é muito mais significativa que a difusividade molecular. Consequentemente todas as espécies químicas iriam mostrar o mesmo comportamento na mistura.

Huang e Thomas (1996) desenvolveram um modelo matemático para investigar as distribuições de composição química do aço que surgem durante mudanças de composição no processo de lingotamento contínuo de placas. O modelo considera escoamento turbulento tridimensional e mistura transiente no molde e no veio, o que significa dizer que o tempo de troca de panelas é pequeno e que a taxa de enchimento do distribuidor é elevada.

Segundo Thomas (1997), a mistura no distribuidor pode ser dividida em três regiões diferentes: volume com escoamento em pistão, volume de mistura perfeita e volume morto. Essa divisão de volumes tem sido utilizada para prever o escoamento no distribuidor em estado estacionário, para diversas configurações de distribuidor. Os efeitos dessas diferentes configurações de distribuidor na mistura, para um mesmo volume total, podem ser analisados através de mudanças nas frações de volume dessas três regiões.

Piccone, Sinha e Madden (2001), realizaram testes em modelo físico e na planta industrial U S Steel, visando determinar uma configuração geométrica do distribuidor, que proporcionasse uma redução no comprimento da placa de mistura que resulta do lingotamento sequencial de qualidades distintas. Dentre as três configurações testadas, as duas que utilizavam inibidor de turbulência (*turbostop*) foram as que resultaram em uma melhor performance.

Antes da realização deste estudo, a troca de placas entre qualidades distintas era feita abaixando-se o nível de aço líquido no distribuidor a aproximadamente 30% do nível normal e introduzindo-se uma placa de separação do molde. O distribuidor era dotado de *baffles*, conforme mostrado na figura 3.9, configuração esta que também foi analisada nos novos testes. As outras duas configurações geométricas analisadas constavam de *turbostop* e barreiras.

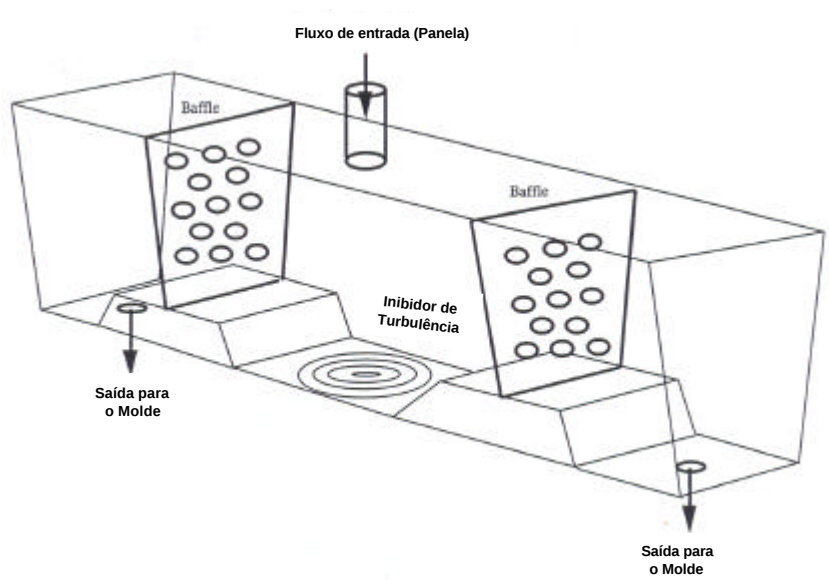


Figura 3.9 – Desenho esquemático do distribuidor da Edgar Thomson Works, mostrando a localização dos dispositivos de controle de fluxo, conforme Piccone, Sinha e Madden (2001)

Segundo os autores, para se reduzir o comprimento da placa de mistura, além de uma geometria adequada, deve-se procurar reduzir o volume de aço líquido no distribuidor antes do início do vazamento da panela seguinte ao mínimo possível. Outros fatores, como taxa de reenchimento, velocidade de lingotamento, temperatura do metal líquido e gradiente de composição química são menos importantes, porém podem interferir no comportamento de mistura, dependendo dos valores utilizados. Os resultados para testes realizados no regime permanente mostram que a fração de volume pistão diminui para o distribuidor equipado com *turbostop* e barreiras, quando comparado com a fração de volume pistão obtido no distribuidor equipado com *baffles*. Entretanto, com a fração de volume morto ocorre o inverso, o que se deve ao fato das barreiras provocarem a formação de um volume estagnado no lado oposto ao fluxo de entrada. Por outro lado o *baffle*, com numerosos buracos, causa um aumento na agitação do banho líquido, aumentando o volume útil do distribuidor. Este tipo de fluxo provocado pelo *baffle* aumenta a taxa de flotação de inclusões, sendo desta forma favorável do ponto de vista da limpeza do aço.

Sinha e Vassilicos (2001) estudam diferentes modificadores de fluxo no distribuidor e comparam a sua utilização no comprimento final da placa de mistura. Foram conduzidos testes para avaliar “*splash*” de aço durante o enchimento do distribuidor, redução da mistura durante a troca de qualidades e efetividade do dispositivo modificador de fluxo em manter a simetria do fluxo para cada veio da máquina de dois veios. No caso descrito, foi testado o distribuidor padrão da Edgar Thomson Works (conforme figura 3.9) e comparado com um novo dispositivo modificador de fluxo o qual chamaram de “*Dogbowl*”. Para os dois tipos de modificadores de fluxo, alguns parâmetros de processo foram avaliados, tais como, uso de diferentes taxa de extração no aço do distribuidor entre os veios e distintos níveis de aço no distribuidor. Quanto à avaliação de *splash* de aço durante enchimento do distribuidor, o dispositivo *Dogbowl* mostrou-se mais eficaz para evitar este fenômeno, porém quando comparados aos testes de troca de panelas, ou seja, os dois tipos de dispositivos na presença de aço líquido, nenhuma diferença no “*splash*” de aço foi evidenciada.

Quando foram comparadas as práticas de troca de qualidades com redução do nível de aço no distribuidor observou-se, para situações de extração de aço similares entre os veios, que o sistema composto por *Baffles* e redutor de impacto gerou cerca de 6 a 8% a menos de placa de mistura

quando comparado as práticas com o *Dogbowl*. Em situações de não similaridade de extração de aço o sistema atual gerou cerca de 55% a menos de placa de mistura. O motivo citado como responsável pelo fato do dispositivo *Dogbowl* não apresentar resultados satisfatórios é a sua alta sensibilidade ao desalinhamento, o que gera padrões de fluxo de aço diferenciados no distribuidor.

Sinha e colaboradores (2002) conduziram vários testes onde ao invés de realizarem misturas com diferentes tipos de aço, utilizaram apenas cobre como elemento traçador, ou seja, elemento de mistura. Para medir a quantidade de cobre, realizaram dois tipos de adição do cobre ao aço. No primeiro o cobre foi adicionado na região da válvula longa, assim que ocorria a abertura da nova panela. Uma série de amostras de aço foi obtida de cada molde em diferentes tempos. No segundo teste o cobre foi adicionado na panela durante o refino secundário, e foram retiradas várias amostras de cada molde assim que a nova panela contendo cobre foi aberta. Em alguns casos uma série de amostras de limalha foi obtida da superfície das placas, para comparação com as amostras do molde. A figura 3.10 mostra a comparação dos dois métodos utilizados.

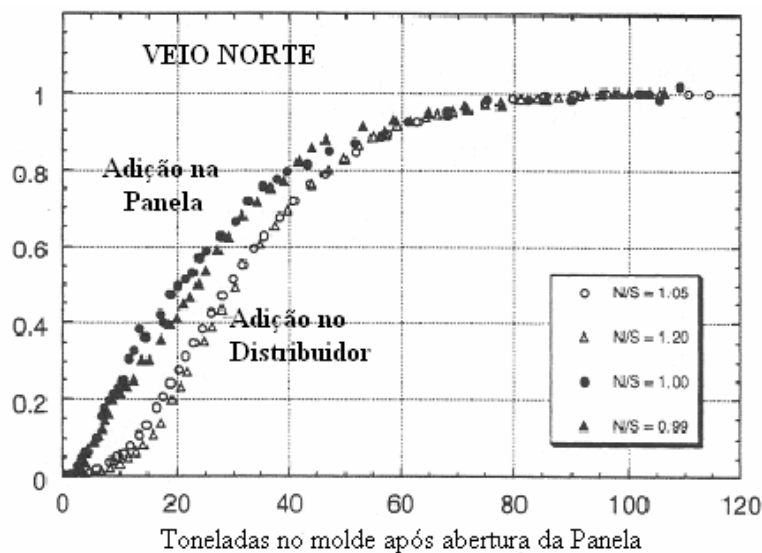


Figura 3.10 – Comparação de Resultados dos dois métodos de adição de cobre, conforme Sinhá e colaboradores (2002).

Nota-se que a composição normalizada aumenta mais rapidamente para o caso de adição na

panela do que na adição no distribuidor. Isto ocorre devido à formação de uma casca sólida em volta do cobre quando ele é adicionado no distribuidor. Deste modo cobre não pode se misturar com o aço líquido até que a casca sólida funda novamente, o que pode produzir um atraso. Existem também atrasos na adição de cobre que podem estar relacionados a razões operacionais. Em geral, devido aos atrasos relacionados ao método de adição feita no distribuidor, o método de adição na panela foi o adotado nas experiências de mistura.

Yu, Dickinson e Skagen (2005) desenvolveram um modelo analítico aplicado no distribuidor da Nucor Steel para determinar o peso da placa formada durante a mistura de aços no lingotamento contínuo. O modelo é baseado na conservação de massa, por meios de dividir o distribuidor em três zonas, zona pistonada, volume morto e zona de mistura. O modelo proposto toma como base cinco parâmetros principais, peso de aço no distribuidor, taxa de reenchimento do distribuidor, taxa de extração de aço do distribuidor, e composição química do aço em lingotamento e composição química do aço a ser misturado.

De acordo com os autores, as placas de troca de qualidades podem ser definidas como aquelas em que a composição química excedeu os limites da especificação da antiga e nova corrida, porém, para alguns tipos de aço, como, por exemplo, aços utilizados para fabricação de tubos, aços denominados API, podem requerer uma análise mais detalhada do produto. A análise do produto normalmente tem uma elevada faixa de composição química especificada em relação à faixa de composição de uma corrida, porém, o processo de lingotamento pode requerer uma limitação máxima ou mínima de alguns elementos para garantir lingotabilidade. Uma variação pequena de propriedades mecânicas pode ser também um limite para aplicação das primeiras placas. Recentemente, trocas de qualidades mais radicais tem sido aplicadas, porém somente são mais recomendadas para aços de até no máximo 0,33% de carbono.

Para validar o modelo proposto, Yu, Dickinson e Skagen (2005) retiraram amostras no molde do lingotamento contínuo durante a troca de qualidades. Através da análise das amostras do molde, foi observado que existe um atraso entre o tempo em que a panela é aberta e o tempo em que ocorre a mistura no molde. É conhecido que existe um tempo para que o aço líquido saia da válvula da panela e seja transferida para a válvula do distribuidor. Este atraso de tempo é definido

como tempo de residência do aço líquido no distribuidor.

Na produção, segundo os autores, a amostragem no molde é uma ferramenta muito útil para determinação do tempo de residência. Para conhecer ao certo a interface entre as duas corridas, é necessário aumentar do número de amostragens, isto porque a concentração de elementos de liga muda rapidamente no início da mistura. Um outro método possível de identificar a interface entre as corridas é através da troca de temperatura no molde. Quando as temperaturas dos termopares do molde cresceram decrescem de certo valor, aquele ponto pode ser definido como o início da mistura no molde.

As amostragens retiradas no molde mostraram boa semelhança ao modelo proposto, conforme pode ser visto na figura 3.11. Através da validação do modelo os autores puderam simular como as variáveis do processo influenciavam no peso da mistura.

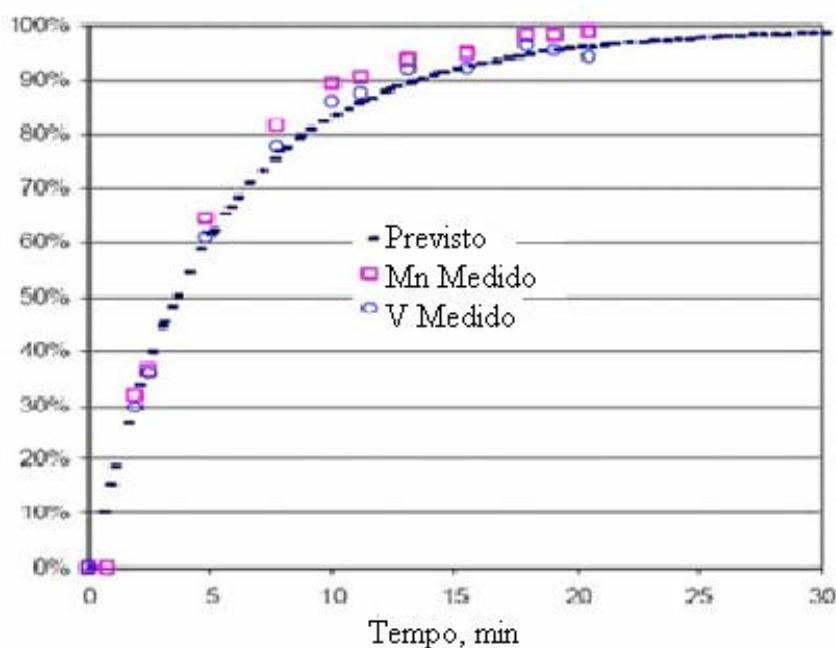


Figura 3.11 - Curva de Concentração de Mn e V versus tempo, segundo Yu, Dickinson e Skagen (2005).

O peso da mistura é influenciado pelo tempo de residência do aço no distribuidor, e este é influenciado pela taxa de reenchimento do distribuidor, conforme mostrado na figura 3.12.

Elevadas taxas de reenchimento (“step-up”) irá requerer elevado tempo de residência e gerar a maior placa de mistura, e a situação em que a taxa de reenchimento é menor que a extração apresenta melhor resultado quanto a geração de placa de mistura. Porém, o peso de aço no distribuidor deve ser mantido acima de um limite mínimo para minimizar o risco de arraste de escória e inclusões devido ao vortéx formado. Quando o nível do aço do distribuidor está muito acima do volume mínimo, situações onde a taxa de reenchimento menor que a taxa de extração são a melhor prática para evitar perda de produtividade e rendimento de aço.

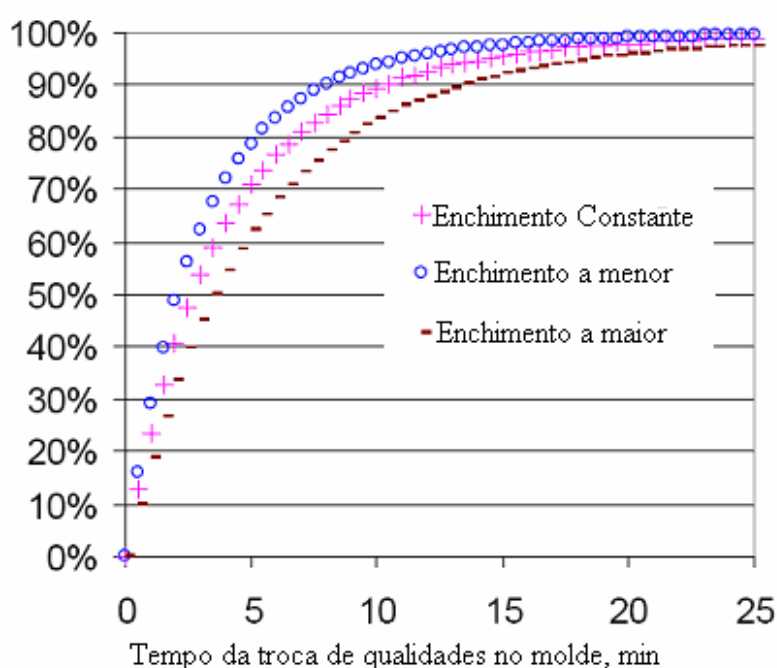


Figura 3.12 - Comparação das concentrações com diferentes padrões de reenchimento, segundo Yu, Dickinson e Skagen (2005).

Yu, Dickinson e Skagen (2005) afirmam que o modelo desenvolvido por eles não está completo, pois é principalmente focado na mistura que ocorre no distribuidor, e isto facilita o entendimento dos efeitos de vários parâmetros na geração da placa de mistura. Os autores recomendam o desenvolvimento de modelos complementares de distribuidor e molde para completo entendimento dos efeitos das variáveis de processo na placa de mistura.

3.5.4 – Modelamento matemático proposto por Huang e Thomas (1996)

Uma das hipóteses básicas no trabalho de Huang e Thomas (1996) é que o transporte axial do soluto devido à turbulência apresenta ordem de importância maior que a difusão molecular e assim predomina no resultado final da distribuição de composição química. Dessa forma, elementos diferentes apresentam o mesmo comportamento na mistura para as mesmas condições de lingotamento, apesar de possuírem difusividades distintas.

O modelo desenvolvido por esses autores permite prever a distribuição da composição química do aço no final da placa de mistura, obtendo-se um resultado semelhante entre o valor previsto e o medido no centro da placa. A mistura nessa região se estende por vários metros abaixo do ponto de transição. A velocidade de lingotamento tem um efeito significativo no comprimento da placa de mistura, enquanto que a largura da placa, a taxa de aumento da velocidade de lingotamento e a geometria da válvula submersa têm efeitos pequenos.

Durante uma troca de placas, com ocorrência de mistura, em uma sequência de lingotamento, a velocidade de lingotamento, o volume total de aço no distribuidor e a vazão de entrada de aço no distribuidor variam com o tempo conforme mostrado na figura 3.13. A mistura inicia-se quando uma nova placa é aberta e uma qualidade diferente da anterior inicia seu escoamento para dentro do distribuidor. Na figura 3.13, o tempo igual a zero representa o momento da abertura da nova placa.

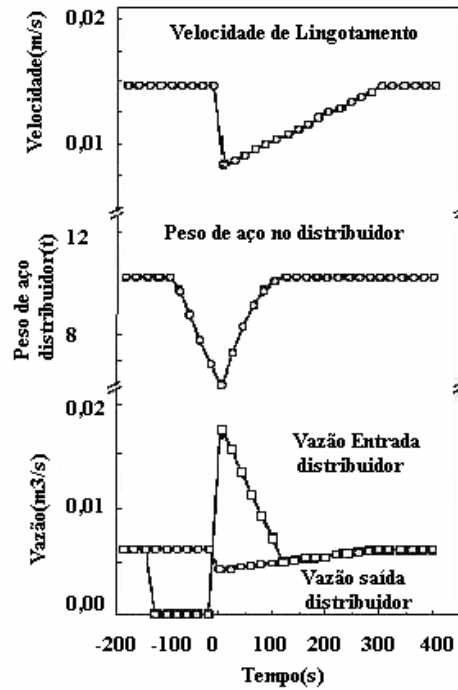


Figura 3.13 - Variação da velocidade de lingotamento, peso de aço no distribuidor e vazão de aço com o tempo para uma troca de painéis, conforme Huang e Thomas (1996).

Segundo os autores, a composição química de um determinado elemento no aço líquido pode ser especificada em função de uma concentração adimensional, C , dada por:

$$C = \frac{F_{(t)} - F_{old}}{F_{new} - F_{old}} \quad (3.1)$$

onde $F_{(t)}$ é a fração do elemento no aço, F_{old} e F_{new} são as frações do elemento na corrida anterior e posterior, respectivamente.

Segundo Huang e Thomas (1996), experiências com injeção de traçador são muitas vezes utilizadas para obter o tempo de escoamento em pistão, t_p , e o tempo médio de residência, t_r , que são calculados utilizando curvas tempo versus concentração. Os resultados são quase sempre caracterizados pela divisão do volume total do distribuidor em três partes a saber: volume de mistura, V_m , volume com escoamento em pistão, V_p , e volume morto, V_d . Esses volumes podem ser calculados através das equações:

$$V_m = (t_r - t_p)Q_{in} \quad (3.2)$$

$$V_p = t_p Q_{in} \quad (3.3)$$

$$V_d = V_T - t_r Q_{in} \quad (3.4)$$

onde Q_{in} é a vazão de entrada no distribuidor e

V_T é o volume total do distribuidor.

Para calcular cada fração de volume do distribuidor, faz-se necessário saber o tempo de residência médio, que é definido como sendo o tempo médio para um elemento individual do fluido percorrer o distribuidor. Ele é calculado pela definição:

$$t_r = \frac{\text{volume do reator}}{\text{vazão volumétrica através do reator}} \quad (3.5)$$

Nesse modelo, elaborado por Huang e Thomas(1996), é necessário solucionar a equação tridimensional turbulenta de Navier-Stokes e também a equação de difusão de massa. Um dos parâmetros críticos nesses cálculos é o coeficiente de difusão efetiva, D_{eff} , definido por:

$$D_{eff} = D_o + \frac{v_t}{Sc_t} \quad (3.6)$$

$$D_t = \frac{v_t}{Sc_t} \quad (3.7)$$

onde Sc_t é o número turbulento de Schmidt que, em geral, é igual a 1. Isso significa dizer que a difusão turbulenta de massa (coeficiente de difusão turbulenta, D) é igual ao transporte de momento turbulento (viscosidade cinética turbulenta, v_t) e independe da composição química do aço. O coeficiente de difusão molecular, D_o , é obtido pela difusão de um dado elemento através de um outro qualquer. Nesses cálculos normalmente ocorre um erro pequeno, em torno de $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, conforme relatado por Thomas (1997).

Huang e Thomas (1996) modelaram a troca de qualidades durante o lingotamento contínuo utilizando uma sistemática que consiste em dividir o sistema em três submodelos, sendo:

- Submodelo de mistura no distribuidor;
- Submodelo de mistura no veio; e
- Submodelo de composição final na placa.

Estes modelos são descritos a seguir.

3.5.4.1 – Submodelo de mistura no distribuidor

O primeiro submodelo avalia as condições de mistura no distribuidor, onde será determinada a composição química do aço que entra no molde.

A modelagem no distribuidor é mais simples em virtude do sistema ser aberto, isso é, mais fácil de ser visualizado utilizando modelos físicos. O modelamento matemático da mistura no seu interior é caracterizado pela análise da variação da composição química na saída, válvula submersa. Assim sendo, admitindo-se como primeira simplificação um misturamento perfeito no distribuidor, a variação da composição química com o tempo, segue uma lei exponencial.

Segundo Huang e Thomas (1996), o comprimento da placa de mistura é função da tonelagem de aço no distribuidor durante a troca de painéis. Assim, pode-se minimizar o comprimento da placa de mistura se são trocados ao mesmo tempo a placa e o distribuidor, pois dessa forma ocorrerá a mistura apenas no veio e não no distribuidor.

Segundo Thomas (1997), a mistura no distribuidor pode ser dividida em três regiões diferentes: volume com escoamento em pistão, volume de mistura perfeita e volume morto. Essa divisão de volumes tem sido utilizada com sucesso para prever o escoamento no distribuidor em estado estacionário, para diversas configurações de distribuidor. Os efeitos dessas diferentes configurações de distribuidor na mistura, para um mesmo volume total, podem ser analisados através de mudanças nas frações de volume dessas três regiões.

Para explicar os efeitos transientes é necessário dividir cada uma dessas regiões em duas, criando, portanto, um total de seis frações de volume, que estão ilustradas na figura 3.14. As primeiras três regiões constituem a primeira zona do distribuidor, enquanto as três outras regiões constituem a segunda zona do distribuidor. O aço proveniente da panela entra inicialmente na primeira região de escoamento em pistão, P1. O escoamento se divide, então, em duas frações, uma parte entra na primeira região de volume morto, D1, e a outra parte vai para a primeira região de volume de mistura perfeita, M1. Em seguida, o escoamento passa para uma segunda zona do distribuidor que é formada inicialmente por uma segunda região de mistura perfeita, M2. Após essa região, ele se divide novamente, uma parte segue para uma segunda região de volume morto, D2, e a outra parte vai para a segunda região de escoamento em pistão, P2. A vazão e a concentração de saída da região P2 é igual a vazão e a concentração de saída do modelo de mistura do distribuidor, uma vez que essa região é a última do modelo.

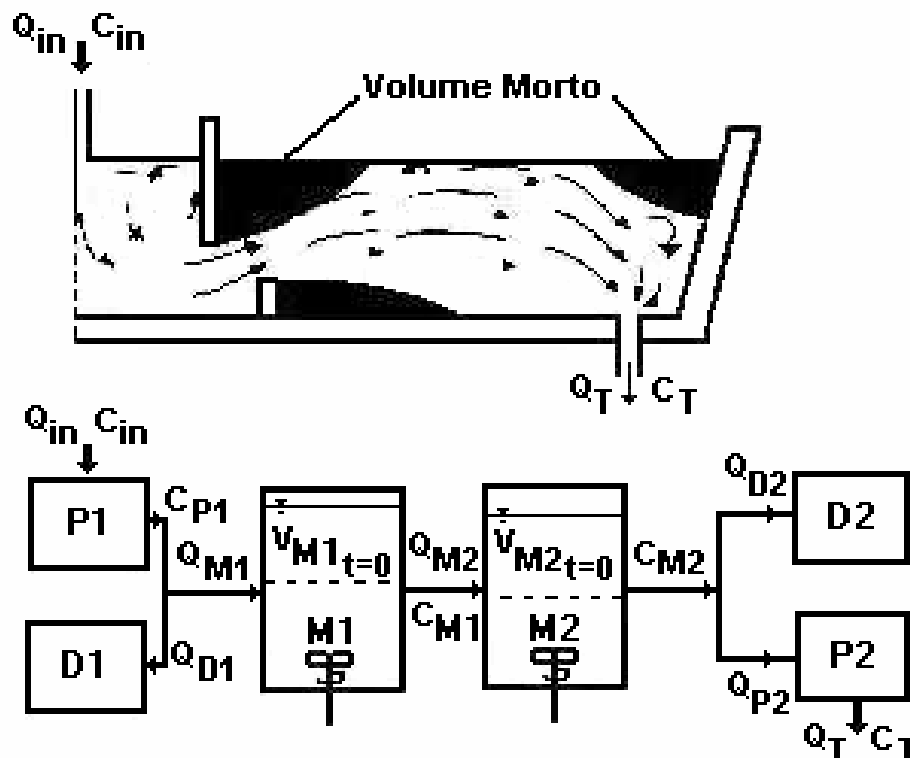


Figura 3.14 - Representação esquemática do modelo de mistura no distribuidor, conforme Huang e Thomas (1996).

A seguir será avaliada cada uma das regiões do distribuidor separadamente.

3.5.4.1.1 – Região de mistura perfeita

As duas regiões de mistura perfeita são conectadas em série no submodelo de mistura no distribuidor, para permitir ajustes instantâneos nas condições de entrada de dados, de modo a manter a concentração de entrada igual à concentração de saída. Têm-se, então, que:

$$\frac{dC_{m1}}{dt} = \frac{Q_{m1}}{V_{m1}} (C_{p1} - C_{m1}) \quad (3.8)$$

$$\frac{dC_{m2}}{dt} = \frac{Q_{m2}}{V_{m2}} (C_{m1} - C_{m2}) \quad (3.9)$$

onde:

C_{m1} = adimensional de concentração saindo da região M1;

V_{m1} = volume da região M1 [m³];

C_{m2} = adimensional de concentração saindo da região M2;

C_{p1} = adimensional de concentração saindo da região P1;

Q_{m1} = vazão volumétrica de entrada da região M1 [m³s⁻¹];

Q_{m2} = vazão volumétrica de entrada na região M2 [m³s⁻¹]; e

V_{m2} = volume da região M2 [m³].

Considerando uma região de mistura perfeita, o balanço de massa das espécies químicas presentes pode ser escrito como:

$$\frac{dM}{dt} = \rho C_{in} Q_{in} - \rho C_{out} Q_{out} \quad (3.10)$$

onde:

ρ = densidade da mistura;

M = massa das espécies nessa região para um tempo t ;

C_{em} = adimensional de concentração das espécies na entrada;

Q_{in} = vazão na entrada da região;

C_{out} = adimensional de concentração das espécies na saída; e

Q_{out} = vazão na saída da região.

De acordo com a definição de vazão de massa, tem-se para um fluido incompressível que:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{d}{dt}(rVC) = rV \frac{dC}{dt} + rC \frac{dV}{dt} \quad (3.11)$$

onde,

C = concentração média do elemento na região; e

V = volume da região.

A conservação total de massa para um fluido incompressível requer que:

$$\frac{dV}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (3.12)$$

Substituindo a equação (3.12) em (3.11) e resolvendo, vem que:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{1}{V} \left(\frac{1}{r} \frac{dM}{dt} \right) - \frac{C}{V} (Q_{in} - Q_{out}) \quad (3.13)$$

Substituindo a equação (3.10) em (3.13) tem-se:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{1}{V} [(C_{in}Q_{in} - C_{out}Q_{out}) - C(Q_{in} - Q_{out})] \quad (3.14)$$

Assumindo uma mistura completa, $C = C_{out}$, obtêm-se a equação de concentração nessa região, que é dada por:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{Q_{in}}{V} (C_{in} - C) \quad (3.15)$$

3.5.4.1.2 – Região de escoamento em pistão

O fluxo em escoamento pistão é aquele no qual todos os elementos do fluido movem-se através de um vaso com um mesmo tempo de residência e preservam suas identidades, isso é, não se misturam durante sua passagem. Portanto, o volume em escoamento pistão é responsável por atrasar a passagem da nova qualidade através do distribuidor. Assim sendo, quanto maior é esse volume no distribuidor menor será a mistura, pois ocorre uma redução no volume de aço no distribuidor para se misturar.

No modelo de Huang e Thomas (1996), a concentração do aço da primeira zona de escoamento em pistão, C_{p1} , incorpora as condições de contorno na entrada do distribuidor:

$$C_{p1} = \begin{cases} 0 & \text{quando } t \leq dt_1 \\ C_{in} & \text{quando } t > dt_1 \end{cases} \quad (3.16)$$

Nessa equação, δt_1 é o tempo na qual a nova qualidade está atrasada para entrar na primeira região de mistura, isso é, o tempo de permanência do fluido nessa região. Esse tempo é calculado sabendo-se o volume da primeira zona de escoamento em pistão e a vazão de aço entrando no distribuidor:

$$\int_{t-dt_1}^t Q_{p1} dt = V_{p1}(t) \quad (3.17)$$

onde,

Q_{p1} = vazão volumétrica entrando na região p_1 ; e

V_{p1} = volume da região p_1 .

De uma maneira similar, a segunda região de escoamento em pistão retarda a concentração através da segunda região de mistura perfeita para entrar no molde:

$$C_T = C_{p2} = C_{m2}(t - dt_2) \quad (3.18)$$

onde o tempo de atraso, δt_2 , é obtido de:

$$\int_{t-dt_2}^t Q_{p2} dt = V_{p2}(t) \quad (3.19)$$

3.5.4.1.3 - Região de volume morto

O volume morto é caracterizado como sendo aquele no qual o fluido apresenta baixa velocidade de escoamento e elevado tempo de residência, sendo portanto um volume indesejável no distribuidor. Normalmente, estes volumes ficam próximos aos modificadores de fluxo, barragens e diques, regiões escuras conforme mostrado na figura 3.14. A existência de volumes mortos reduzem efetivamente o volume avaliado para a mistura e para escoamento em pistão. Duas zonas de volume morto são assumidas para caracterizar o volume morto no distribuidor, no modelo proposto por Huang e Thomas (1996).

3.5.4.1.4 – Considerações para situação transiente

O volume total do distribuidor, V_T , e a vazão do aço na entrada, Q_{in} , estão relacionados para satisfazer o balanço global de massa no distribuidor de acordo com:

$$Q_{in} = \frac{dV_T}{dt} + Q_T \quad (3.20)$$

onde:

$$Q_T = WNv_c(t) \quad (3.21)$$

e:

$$V_T = \frac{M_T}{r} \quad (3.22)$$

onde:

W = largura da placa;

Vc = velocidade de lingotamento;

N = espessura da placa.

O modelo de Huang e Thomas (1996) necessita, como dado de entrada, da variação do peso de aço no distribuidor, M_T , com o tempo. A velocidade de lingotamento dependente com o tempo, $v_c(t)$, pode ser especificada de maneira similar. Para cada intervalo de tempo, o modelo assume uma pequena variação da velocidade de lingotamento e uma variação do volume do distribuidor, para calcular Q_{in} como uma função do tempo.

O volume de cada zona, V_i , é calculado para cada fração de volume e para o volume total do distribuidor:

$$V_i = f_i V_T \quad i = m1, m2, p1, p2, d1 \text{ e } d2 \quad (3.23)$$

Para a conservação total de massa é necessário que:

$$f_{p1} + f_{p2} + f_{m1} + f_{m2} + f_{d1} + f_{d2} = 1 \quad (3.24)$$

Aplicando a conservação de massa para cada zona, obtêm-se:

$$Q_i = Q_{i,in} - \frac{dV_i}{dt} \quad i = m1, m2, p1, p2, d1 \text{ e } d2 \quad (3.25)$$

Integrando essas equações, tem-se o volume de aço em escoamento, entrando em cada zona:

$$Q_{p1} = Q_{in} \quad (3.26)$$

$$Q_i = Q_{i-1} - (Q_{in} - Q_T) f_i - V_T \frac{df_i}{dt} \quad i = m1, m2 \text{ e } p2 \quad (3.27)$$

onde df_i/dt é calculado numericamente considerando a variação de f_i com o tempo e assumindo uma pequena variação linear de f_i para cada intervalo de tempo. Os valores iniciais dessas frações de volume podem entrar no modelo baseado em resultados empíricos obtidos.

Para generalizar o modelo e manipular a variação do volume total do distribuidor com o tempo, as frações de volume são ajustadas com o tempo. O procedimento consiste em assumir que a fração de volume em escoamento pistão total, a fração de volume total misturado e a fração de volume morto de cada região permanecem constante com o tempo.

Por exemplo, durante um aumento contínuo do volume total do distribuidor, a fração de volume para cada parte da segunda zona diminui para manter os valores originais:

$$f_{p2}(t) = \frac{V_T(t=0)}{V_T} f_{p2}(t=0) \quad (3.28)$$

$$f_{m2}(t) = \frac{V_T(t=0)}{V_T} f_{m2}(t=0) \quad (3.29)$$

A fração de volume da região correspondente a primeira zona aumenta para satisfazer as condições de volume em escoamento pistão total e volume total misturado constantes:

$$f_{p1}(t) = f_{p1}(t=0) + f_{p2}(t=0) - f_{p2}(t) \quad (3.30)$$

$$f_{m1}(t) = f_{m1}(t=0) + f_{m2}(t=0) - f_{m2}(t) \quad (3.31)$$

Huang e Thomas (1996) consideram que o volume morto e as frações de volume estão definidos na equação 3.20. Eles utilizaram apenas quatro constantes empíricas independentes para simular o modelo em uma condição arbitrária.

As condições iniciais devem ser especificadas. No momento da abertura da nova panela, a composição de cada zona é dada por:

$$C_i(t=0)=0 \quad i = m1, m2, p1, p2, d1 e d2 \quad (3.32)$$

A condição de contorno da concentração entrando no distribuidor é especificada sempre pela nova qualidade, corrida seguinte:

$$C_{in}(t \geq 0)=1 \quad (3.33)$$

3.5.4.2 – Submodelo de mistura no veio

O submodelo de mistura no veio é uma continuação do submodelo de mistura no distribuidor, da mesma forma que ocorre com o escoamento do aço no lingotamento contínuo. A mistura que ocorre no distribuidor é conhecida como mistura positiva enquanto a mistura no veio é chamada de mistura negativa. A concentração entrando no molde como uma função do tempo afeta significativamente a distribuição da composição química no produto final.

O submodelo de mistura no veio proposto por Huang e Thomas (1996) divide essa região de mistura em três zonas, S1, S2 e S3, como ilustrado na figura 3.15. São consideradas duas zonas bem misturadas na parte superior do molde, S1 e S2, e uma zona de difusão na porção inferior da poça líquida, que vai até o ponto final de solidificação, S3. Uma aproximação para a mistura é novamente usada para simular a zona superior e a equação unidimensional da difusão é resolvida na zona inferior por diferenças finitas.

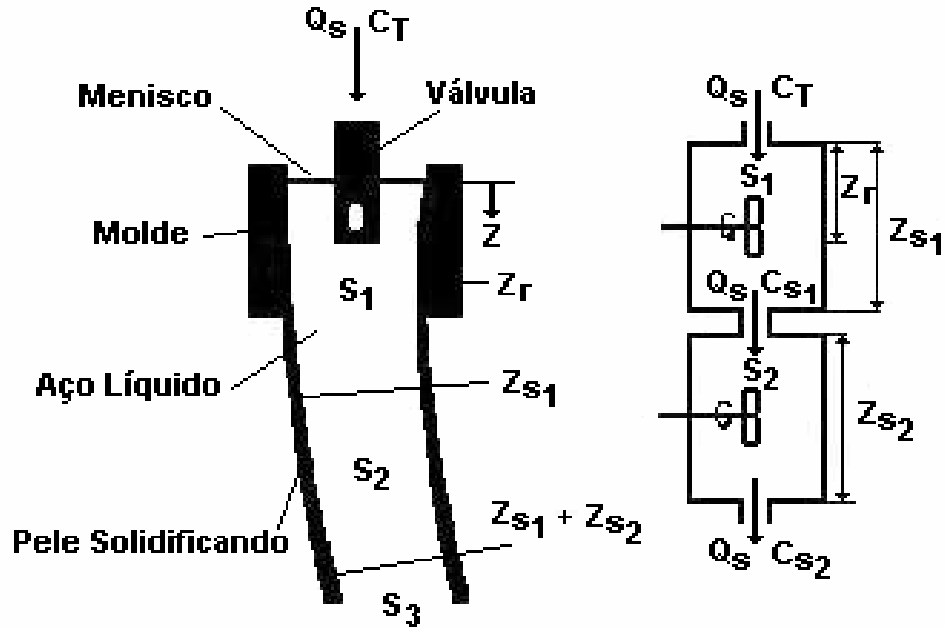


Figura 3.15 - Esquema mostrando as três regiões do submodelo de mistura no veio, conforme Huang e Thomas (1996).

3.5.4.2.1 – Mistura na região superior do veio

A região superior do veio está representada na figura 3.15 pelas áreas S1 e S2. Segundo Thomas (1997) é necessário estudá-la separadamente, pois incorpora o forte escoamento turbulento que ocorre. Essa região é simplificada em dois volumes inteiramente misturados, interligados um ao outro em série. A concentração é governada pelas mesmas equações desenvolvidas e empregadas no modelo do distribuidor:

$$\frac{dC_{s1}}{dt} = \frac{Q_{s1}}{V_{s1}} (C_T - C_{s1}) \quad (3.34)$$

$$\frac{dC_{s2}}{dt} = \frac{Q_{s2}}{V_{s2}} (C_{s1} - C_{s2}) \quad (3.35)$$

A concentração entrando na primeira região do veio, C_T , é obtida do modelo de mistura no distribuidor descrita anteriormente, equivale a C_{p2} . Para uma condição de troca de distribuidor, C_T é definido como sendo igual a 1, representando uma nova qualidade.

Na abertura da panela, cada uma das regiões contém apenas uma qualidade, que é definida como condição inicial:

$$C_{s1}(t=0) = C_{s2}(t=0) = 0 \quad (3.36)$$

O volume de cada uma das regiões corresponde aproximadamente aos volumes recirculados da zona superior e inferior. Estas regiões são observadas nos moldes que empregam válvulas submersas com duas saídas e seus volumes são dados por:

$$V_{s1} = NWZ_{s1} \quad (3.37)$$

$$V_{s2} = NWZ_{s2} \quad (3.38)$$

Nas equações 3.33 e 3.34, Z_{s1} e Z_{s2} denotam os comprimentos específicos de cada zona de mistura, determinados empiricamente.

A vazão de aço através de cada região é calculada simplesmente por:

$$Q_{s1} = Q_{s2} = Q_s = NWv_c(t) \quad (3.39)$$

3.5.4.2.2 – Difusão na região inferior do veio

Essa região é representada pela área S3 na figura 3.15. Nessa região, o aço está movendo-se para baixo com uma velocidade uniforme. Nesse caso, uma nova mistura ocorre devido a difusão turbulenta no aço líquido remanescente. Macrosegregação pode também ocorrer, mas foi ignorada no trabalho de Huang e Thomas (1996). Desse modo, foi adotada uma equação

unidimensional transiente para a transferência de massa, expressando a variação da concentração, C_{s3} , entre o fim da segunda zona de mistura e o fim da poça líquida:

$$\frac{\partial C_{s3}}{\partial t} + v_z = D_{eff} \frac{\partial^2 C_{s3}}{\partial z^2} \quad \text{para} \quad Z_{s1} + Z_{s2} < Z \leq Z_{met} \quad (3.40)$$

O coeficiente de difusão efetiva, D_{eff} , na equação 3.40 é normalmente regido pela componente turbulenta, v_z/Sc_t , como descrito na equação 3.7. Tanto D_{eff} como a velocidade de escoamento, v_z , são calculados usando relações empíricas, determinadas através de calibração do modelo com dados industriais.

Segundo Huang e Thomas (1996), o coeficiente de difusão efetiva, D_{eff} , e a velocidade de escoamento, v_z , necessárias para resolver a equação 3.36 são definidos como uma função empírica da velocidade de lingotamento, da espessura do veio, N , e da largura da placa, W . As funções são calibradas para igualar os resultados do modelo turbulento com os resultados obtidos das amostragens das placas para as diversas condições de lingotamento.

O comprimento metalúrgico é definido como sendo o ponto onde termina a solidificação, região onde os últimos traços de aço líquido solidificam, Z_{met} . Essa região geralmente estende-se até aproximadamente 20 a 40 metros abaixo do menisco, dependendo das condições de lingotamento. Essa posição é definida pelo final da poça líquida. A condição de saída obrigatória é definida como sendo a composição química da corrida anterior:

$$C_{s3}(t) = 0 \quad z > Z_{met} \quad (3.41)$$

$$\frac{\partial C_{s3}}{\partial z} = 0 \quad z = Z_{met} \quad (3.42)$$

A concentração de entrada é igual a de saída para a segunda região de mistura, assim:

$$C_{s3}(t) = C_{s2} \quad z = Z_{s1} + Z_{s2} \quad (3.43)$$

e a condição inicial da qualidade anterior é:

$$C_{s3}(t = 0) = 0 \quad (3.44)$$

No trabalho de Huang e Thomas (1996), as equações 3.40 até 3.44 foram discretizadas usando o esquema “upwind”. As equações de diferenças finitas resultantes foram calculadas usando TDMA, algoritmo de matriz tridiagonal. Para simular o tempo do lingotamento contínuo na prática industrial, aproximadamente 30 minutos, serão necessários aproximadamente 200 incrementos de tempo, conforme mencionado por Huang e Thomas (1996).

3.5.4.3 – Submodelo de composição final na placa

O último submodelo proposto por Huang e Thomas (1996), calcula a distribuição da composição química na placa. Para obter essa composição final, C_p , foram realizadas transformações nas coordenadas da concentração no veio, obtidas através do modelo matemático $C_i(i=s_1, s_2, s_3)$. Essas transformações são obtidas por:

$$C_p(x_p, y_p, z_p) = C_i(x, y, z, t) \quad (3.45)$$

onde as coordenadas x, y, z e t estão relacionadas com as coordenadas da placa, produto final, x_p, y_p e z_p , através das seguintes equações:

$$x = x_p, y = y_p, z = \int_{t-t_{sh}}^t v_z dt, t = t_{sh} - \int_0^{z_p} \frac{dz}{v_z} \quad (3.46)$$

Na equação 3.46, t representa o tempo decorrido desde a abertura da panela. A outra variável de tempo, t_{sh} , representa o tempo de solidificação de um ponto do menisco até uma posição z no veio. Como essa variável de tempo varia com a velocidade de lingotamento, permite levantar o perfil de solidificação da poça líquida com o tempo.

Para calcular t_{sh} é necessário assumir uma relação entre kt^n e a espessura da camada sólida S :

$$t_{sh} = \left(\frac{S}{k_a} \right)^{\frac{1}{n_a}} \quad S \leq S_b \quad (3.47)$$

$$t_{sh} = \left(\frac{S_b}{k_a} \right)^{\frac{1}{n_a}} \left(1 + \frac{n_b S}{n_a S_b} - \frac{n_b}{n_a} \right)^{\frac{1}{n_b}} \quad S > S_b \quad (3.48)$$

As constantes de solidificação, k_a , S_b , n_a e n_b dependem das condições de resfriamento secundário utilizadas no veio e das dimensões da seção transversal da placa. As equações 3.47 e 3.48 foram adotadas por Huang e Thomas (1996), pois permitem obter uma relação entre a espessura sólida e a taxa de solidificação nas regiões de solidificação. A figura 3.16 mostra o perfil de resfriamento secundário assumido no modelo. Ela mostra a variação da espessura solidificada com o tempo para duas condições diferentes de resfriamento secundário do lingotamento contínuo.

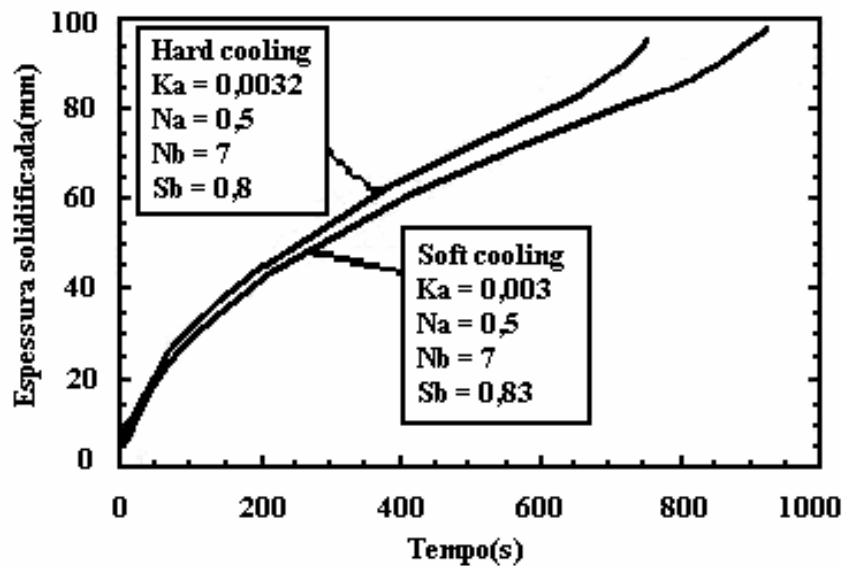


Figura 3.16 – Variação da espessura da pele solidificada em função do tempo para diferentes condições de resfriamento secundário, conforme apresentado por Huang e Thomas(1996).

Os resultados finais obtidos pelo modelo de Huang e Thomas (1996), mostram uma diferença no valor do adimensional de concentração quando se analisa as regiões da superfície, do meio e do centro da placa de mistura. Em cada caso, o comprimento da placa de mistura gerada é diferente, conforme mostra a figura 3.17.

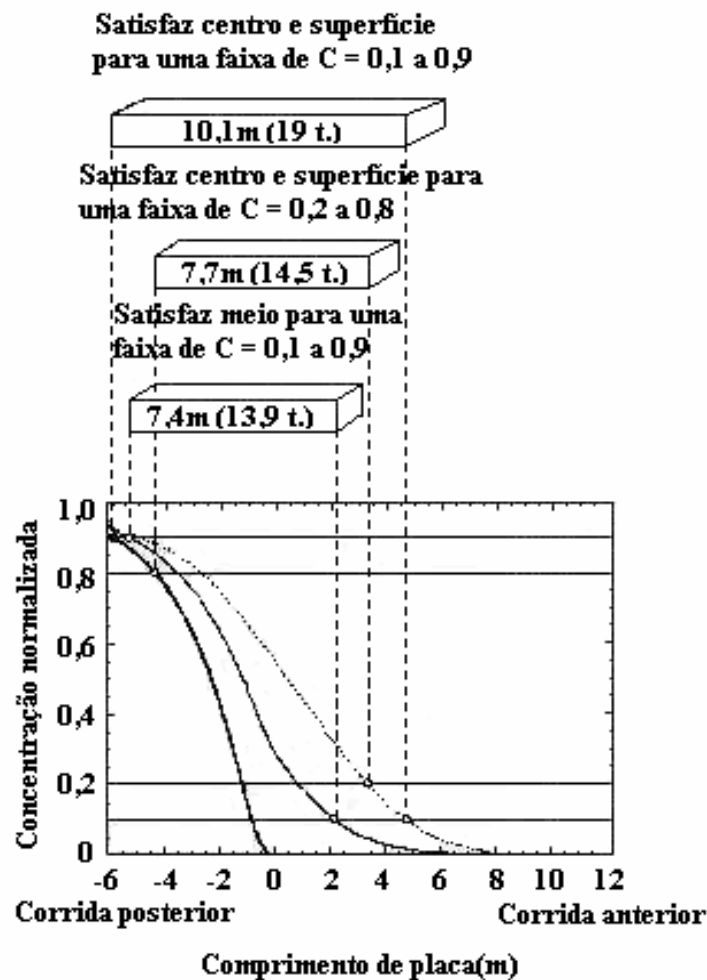


Figura 3.17 – Resultado típico obtido pelo modelo desenvolvido por Huang e Thomas(1996).

Finalmente, Huang e Thomas (1996) compararam os resultados obtidos pelo modelo matemático desenvolvido com resultados práticos realizados na máquina de lingotamento contínuo de placas da Armco Butler Works.

A figura 3.18 mostra os resultados obtidos pelo modelo, considerando o valor do adimensional de concentração no centro e na superfície da placa, e comparada com valores reais obtidos na Armco.

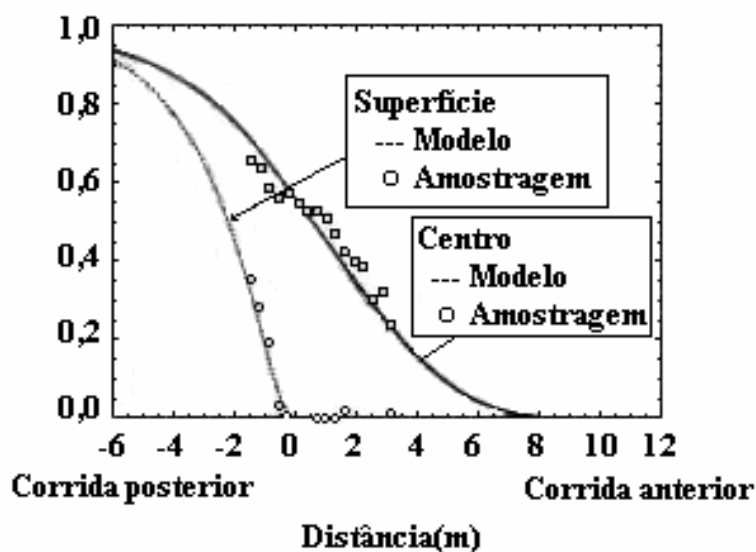


Figura 3.18 – Comparação do resultado previsto pelo modelo para a composição química na placa com os resultados práticos para uma troca de painéis na Armco – Huang e Thomas (1996).

Pelo resultado apresentado na figura 3.18, pode-se concluir que existe uma boa concordância entre os valores previstos pelo modelo matemático de Huang e Thomas (1996) com os valores obtidos após amostragem em placas de mistura produzidas na Armco. Os resultados estão coerentes tanto para amostras retiradas no centro como na superfície da placa. Esse fato é importante pois garante a confiabilidade do modelo desenvolvido, possibilitando sua aplicação on-line. Sendo que este modelo foi aplicado com sucesso no processo industrial da Armco, e por isso adotado como referência para o modelo matemático elaborado.

4. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do trabalho fez-se necessário dividi-lo em três partes. Uma parte teórica que trata do desenvolvimento do modelo matemático para analisar a mistura formada durante a troca de qualidades no lingotamento contínuo. A segunda etapa trata do modelamento físico do distribuidor atual da CST (MLC#1) com o objetivo de ajustar o modelo matemático desenvolvido. Isto corresponde a determinar as curvas de mistura no distribuidor, que possam ser alimentadas a um modelo matemático de solidificação no molde, local onde se completa a transição. A terceira parte é responsável pela validação do modelo matemático através de experimentos práticos.

Para a determinação das curvas de transição de composição química válidas para o distribuidor foi construído um modelo físico em acrílico, escala 1:3, representado na figura 4.1. Trata-se do distribuidor da máquina de lingotamento contínuo nº1 da CST, e suas características são apresentadas na tabela IV.1. Como líquido de simulação foi utilizado água a temperatura ambiente, como traçador, utilizou-se KCl para obtenção das curvas de transição.



Figura 4.1 – Foto do modelo experimental do distribuidor da CST

Tabela IV.1: Características físicas do distribuidor estudado.

CARACTERÍSTICAS DO DISTRIBUIDOR ESTUDADO	
Forma	Paredes laterais inclinadas com fundo curvo
Capacidade (t)	40
Número de veios	Dois
Paredes do topo	Inclinadas (80° em relação à horizontal)
Comprimento (m)	7,32 (superfície) e 6,90 (fundo)
Largura na superfície (m)	1,23
Altura (m)	1,20
Raio do fundo (m)	0,44
Saídas dos veios	Rebaixadas em relação ao fundo (0,12 m)
Diâmetro da válvula longa (m)	0,12
Diâmetro da válvula submersa (m)	0,12

O período de troca de panelas é modelado pela consideração do distribuidor estar-se esvaziando até um nível mínimo, devido à interrupção da alimentação quando uma panela, ao se esgotar, é retirada do circuito, como ocorre nas operações industriais. Com a nova panela, a uma vazão maior que a de lingotamento, o nível é restaurado ao regime permanente de trabalho. Para simular os diferentes graus dos aços utiliza-se adição de traçador em de grau, para caracterização de fluxo.

Deste modo, inicialmente faz-se o sistema entrar em regime permanente no nível usual de trabalho. A seguir interrompe-se a corrente de água e aguarda-se que o distribuidor alcance um nível mínimo de trabalho, e inicia-se a admissão de água com traçador (KCl) com vazão maior que a vazão de saída, até que o distribuidor atinja seu nível usual de trabalho. Os experimentos realizados requerem um controle de vazão de entrada e saída do líquido no distribuidor; medição de concentração de traçador na entrada e saída, conforme pode ser visto na Figura 4.2. Estes dados, bem como o tempo decorrido nos experimentos, são colhidos e armazenados em um computador, para controle de processo e para análises posteriores.

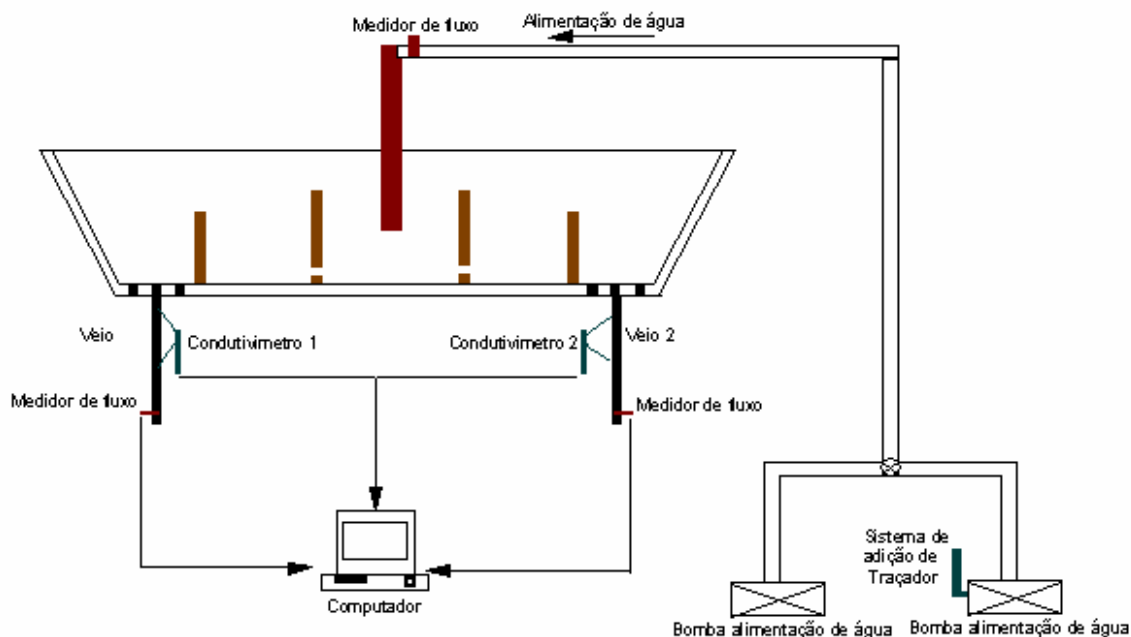


Figura 4.2 – Desenho esquemático do Modelo Físico do Distribuidor da CST

Alguns resultados são apresentados na tabela IV.2 e na Figura 4.3.

Tabela IV.2: Resultados das simulações

Bateria Testes	Vazão Total (t/min)	Reench. (t/min)	Reench/Vazão	Nível (t)	Intervalo Descarte (s)		Volume de Descarte (t)	
					Veio 1	Veio 2	Veio 1	Veio 2
1	8,51	12,45	1,46	22	108,04	94,9	7,40	6,30
2	8,60	12,60	1,47	15	71,82	66,90	4,76	4,19
3	8,63	15,75	1,83	22	93,08	87,95	6,61	6,07
4	8,50	16,20	1,90	15	73,70	60,15	5,05	3,92
5	10,50	15,23	1,45	22	80,32	74,89	6,92	6,45

Cada bateria de testes consiste de 6 testes nas mesmas condições para fornecer os resultados médios, representados na Tabela IV.2.

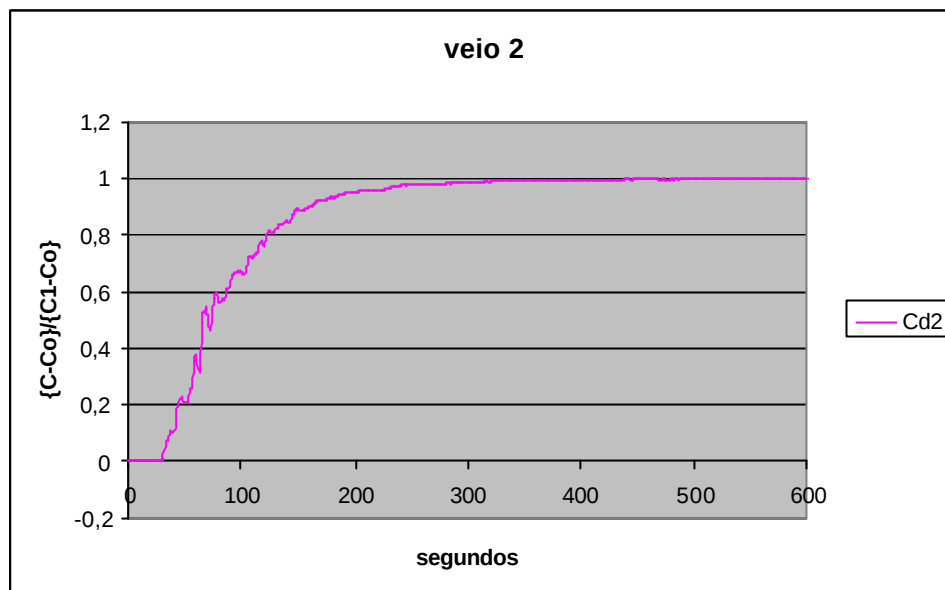


Figura 4.3 – Curva de transição, na saída do distribuidor, considerando vazão de 8,68 ton/min, razão de reenchimento 1,43 e nível mínimo 22 ton.

Destes testes realizados retiramos o valor de Tempo Mínimo, o qual corresponde a um retardo no processo de mistura, e a curva de transição, a qual define indiretamente a composição química do aço em processo de solidificação no molde. Serão utilizados valores médios de uma sequência de replicatas correspondente a cada combinação de parâmetros operacionais (vazão, reenchimento, nível mínimo, controlador de fluxo, tempo de espera). A posição e comprimento da placa de mistura, conforme previsto pela curva de transição do distribuidor serão comparados com os resultados do modelo completo, conforme descrito nesta proposta. Os outros dados são apresentados no sentido de ilustrar as características do processo de mistura no distribuidor.

Para um completo modelamento de toda região de mistura faz-se necessário além da determinação da mistura no distribuidor, conhecer o comportamento do efeito da mistura de aço no interior do molde. Portanto é necessária a construção de um modelo capaz de representar a solidificação do aço no molde, sendo que um dos dados de entrada deste modelo é a curva de transição do distribuidor.

De acordo com este modelo, sendo C_o a concentração de um dado elemento de interesse referente à panela que se esgota e sendo C_1 a concentração referente à panela que entra em

regime de vazamento a curva F de transição seria dada por

$$F = \frac{C - C_0}{C_1 - C_0} \quad (4.1)$$

onde C representa a variação temporal de composição na saída do veio. Portanto a curva F representa uma normalização das composições no intervalo (0,1), o primeiro valor indicando início e o segundo final de transição.

Conforme proposto por Szekeres (2005) admite-se ainda que o processo de solidificação – formação da pele no molde – pode ser descrito pela equação semi-empírica

$$d \text{ [mm]} = k \sqrt{t \text{ [min]}} \quad (4.2)$$

onde **d** indica espessura de pele, **t** o tempo de extração de calor e **k** uma “constante”, função das condições de resfriamento e, usualmente, com valor em torno de 25, para o caso da CST estes valores estão entre 25,5 e 26,5. Portanto, desde que numa dada área de seção reta da placa se superpõem camadas de sólido formadas em instantes diferentes seria possível observar, a partir do instante de abertura da segunda panela, uma gradação de composição tal como sugerida na Figura 4.4. De acordo com a mesma, valores crescentes de F seriam notados desde a periferia até o centro da placa, isto é, a transição se completa primeiro nas regiões centrais.

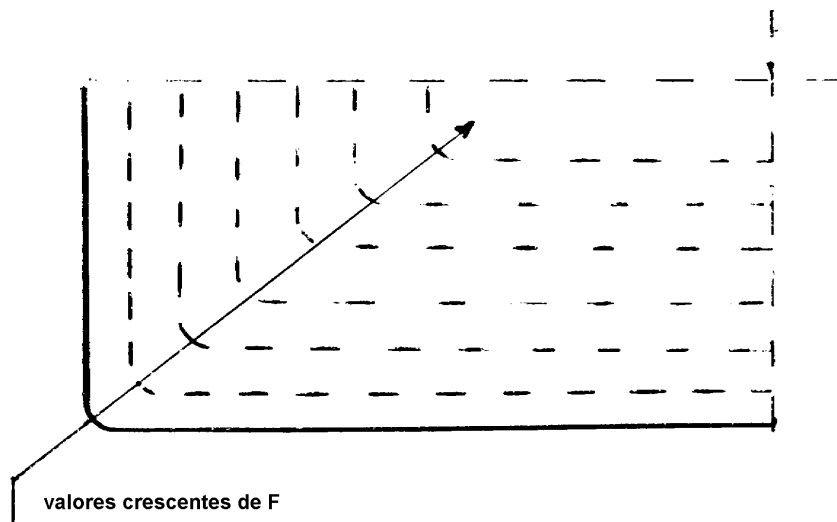


Figura 4.4: Perfil esquemático de composição na área de seção reta da placa, após início de transição.

Cada camada de sólido depositada é o resultado da composição do líquido na frente de solidificação. Entretanto esta composição não corresponde à composição do aço líquido que sai do distribuidor, sendo de fato uma função complexa inclusive da posição e das condições de fluxo no interior do molde. A composição média do aço **líquido** no interior do molde varia ao longo do tempo desde que as composições de entrada – aço provindo do distribuidor – e de saída – aço consumido no processo – divergem. Um balanço de conservação permite escrever, como Taxa de Acumulação, Taxa de Variação de Composição do aço líquido na poça, Figura 4.5:

$$V_{poça} \frac{dF}{dt} = Q \{ F_E - F \} \quad (4.3)$$

onde representam $V_{poça}$, o volume de líquido no interior do molde [m^3]; Q , a vazão volumétrica de aço, [m^3/s]; F_E , a composição adimensional do aço que entra na poça, isto é a composição do efluente do distribuidor tal como determinada pela curva de transição do distribuidor; F , a composição no interior da poça. A expressão admite que a vazão de entrada deve ser igual à vazão de saída em regime macroscopicamente permanente, e pode ser utilizada para atualizar a composição do líquido na poça – frente de solidificação – desde que $V_{poça}$ pode ser facilmente calculado por integração ao longo do eixo longitudinal da placa, admitindo crescimento de pele de acordo com a formula semi-empírica já citada.

Conforme Szekeres (2005), se a variável ESP [m], representa a meia espessura da placa, o tempo necessário para solidificação completa da mesma, TSOL [s] será dado por

$$TSOL = \left\{ \frac{ESP \cdot 1000}{K_s} \right\}^2 60 \quad (4.4)$$

enquanto que o comprimento metalúrgico M [m], isto é, a profundidade estimada da poça, seria

$$M = \frac{V_c}{60} TSOL \quad (4.5)$$

onde V_c representa a velocidade de lingotamento, [m/min], 1000 e 60 representam ajuste de unidade.

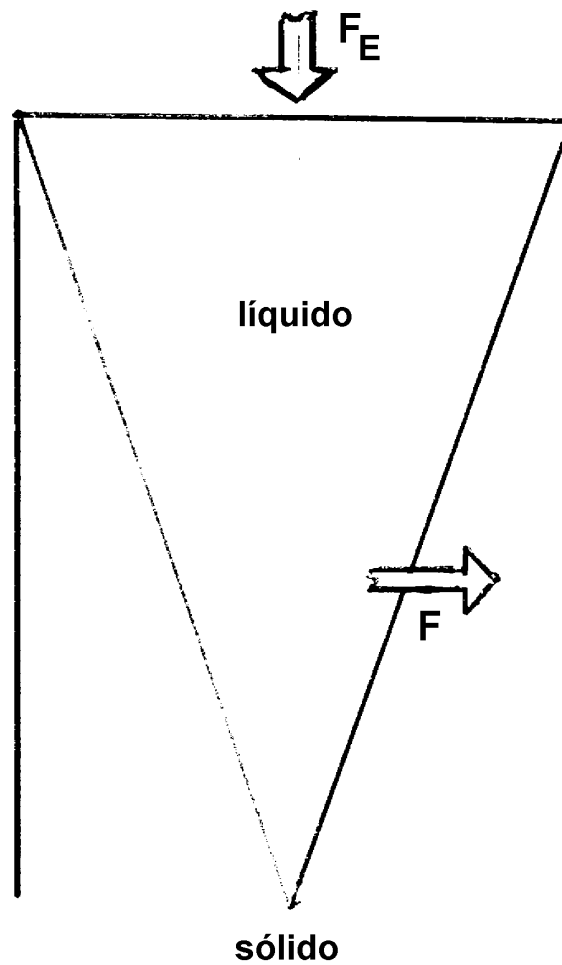


Figura 4.5: Esquema para determinar a variação de composição do líquido na poça líquida

Neste caso, num dado instante t após o início da transição o centro da placa se solidifica à profundidade M com composição F , ao passo que a porção exterior da pele teria se formado no instante $t - TSOL$ com composição F' , defasada em relação ao núcleo de acordo com a curva de transição da poça, vide Figura 4.6. As posições intermediárias correspondem há tempos intermediários e composições intermediárias.

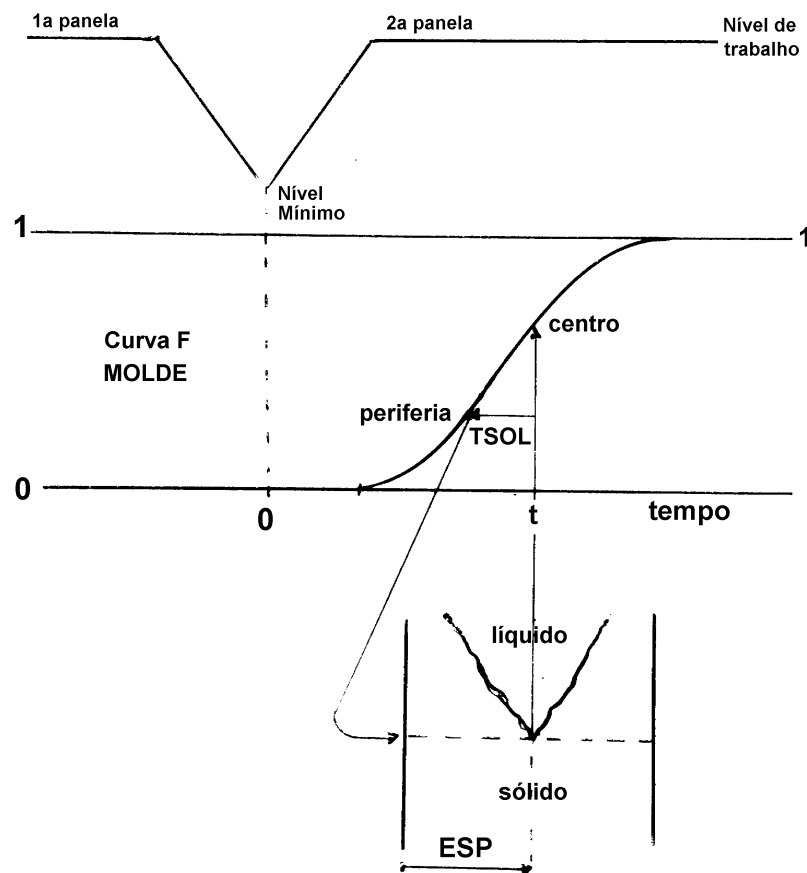


Figura 4.6: Distribuição de composição de pele em função da curva de transição no molde.

De posse destes argumentos um programa para estimar a distribuição dos vários elementos numa dada área de seção reta pode ser implementado de imediato. A Figura 4.7 apresenta um quarto de uma seção genérica da placa, dividida em uma malha ($I=1, NPI$; $J=1, NPJ$). Num dado instante t , o material do nó (NPI, NPJ) se solidifica com composição F ; pode então ser calculado quanto tempo antes a porção referente ao nó (I, J) teria se solidificado; a composição referente a este nó genérico pode ser facilmente inferida se a curva de transição do distribuidor – e logo do líquido no molde – estiver disponível. Este procedimento poder ser repetido de modo a varrer toda a área da seção reta e qualquer tempo demandado.

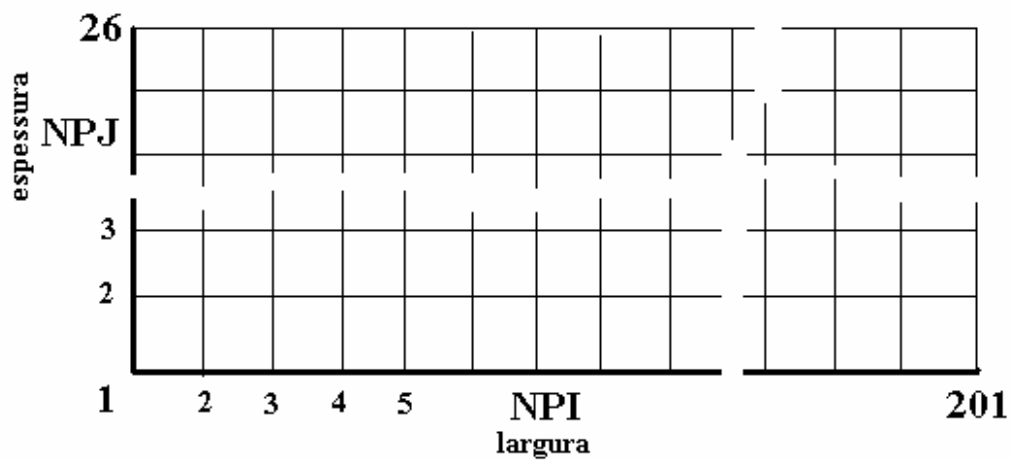


Figura 4.7: Malha de integração correspondente a $\frac{1}{4}$ da seção reta da placa. Linhas em negrito representam a superfície da placa

A Figura 4.8 apresenta uma sequência de curvas de transição: 1 – na porção de líquido no molde, o que corresponde a ao centro da placa; 2- a 7,5 cm da periferia; 3- na superfície externa, periferia; 4 – o valor médio.

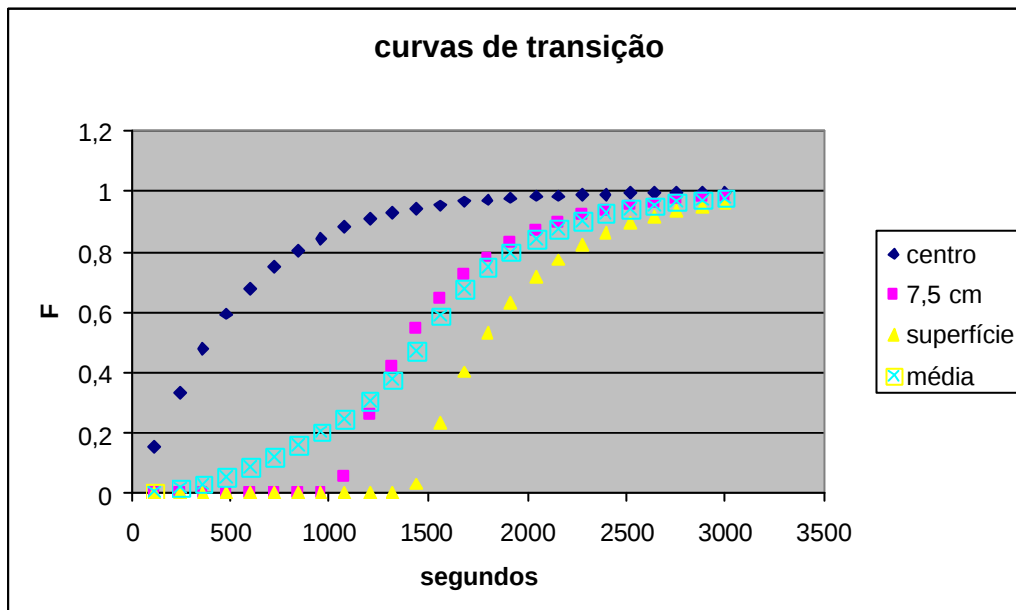


Figura 4.8: Curva de transição no molde.

4.1 – Validação do Modelo

Finalmente, para a validação do modelo matemático desenvolvido foram realizadas amostragens em uma placa de mistura obtida na operação industrial do lingotamento contínuo da CST.

Para essa amostragem foi necessário primeiramente criar procedimentos operacionais para a realização da troca de qualidades de aços no mesmo distribuidor, tendo em vista que tal operação não era adotada pela CST. Procurou-se fazer com que os procedimentos experimentais fossem similares às práticas adotadas ao desenvolvimento deste trabalho, por exemplo, redução do volume de aço no distribuidor no momento de abertura da nova panela. Porém, os riscos operacionais também foram levados em conta, tais como, não realização de mistura entre aços que utilizam diferentes pós fluxantes no molde, para assim evitar o risco de rompimento da pele de aço.

Após a definição dos procedimentos de troca de qualidade de aços no mesmo distribuidor, a mistura foi realizada e suas condições foram registradas. Com isso as simulações com o modelo matemático foram semelhantes à realizada na prática operacional. Após o acompanhamento das práticas de mistura, a placa de mistura gerada foi separada para a retirada de amostras.

A placa de mistura obtida durante a operação industrial foi amostrada no centro, a 7,5cm da superfície e na superfície, conforme ilustrado nas figuras 4.9 e 4.10. As placas de mistura foram cortadas conforme a necessidade de amostragem. A distância entre cada amostra foi de 1m.

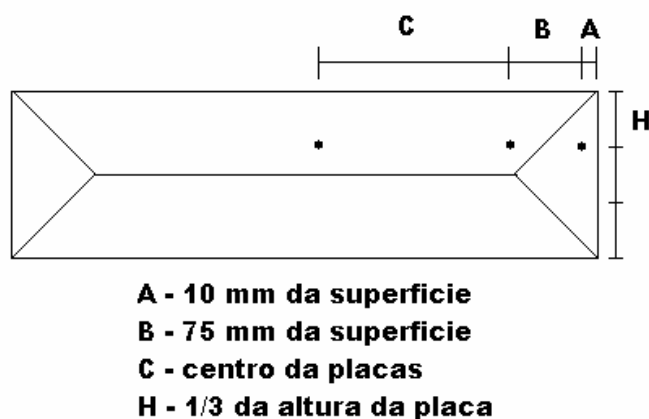


Figura 4.9: Figura esquemática do posicionamento das amostragens na seção transversal

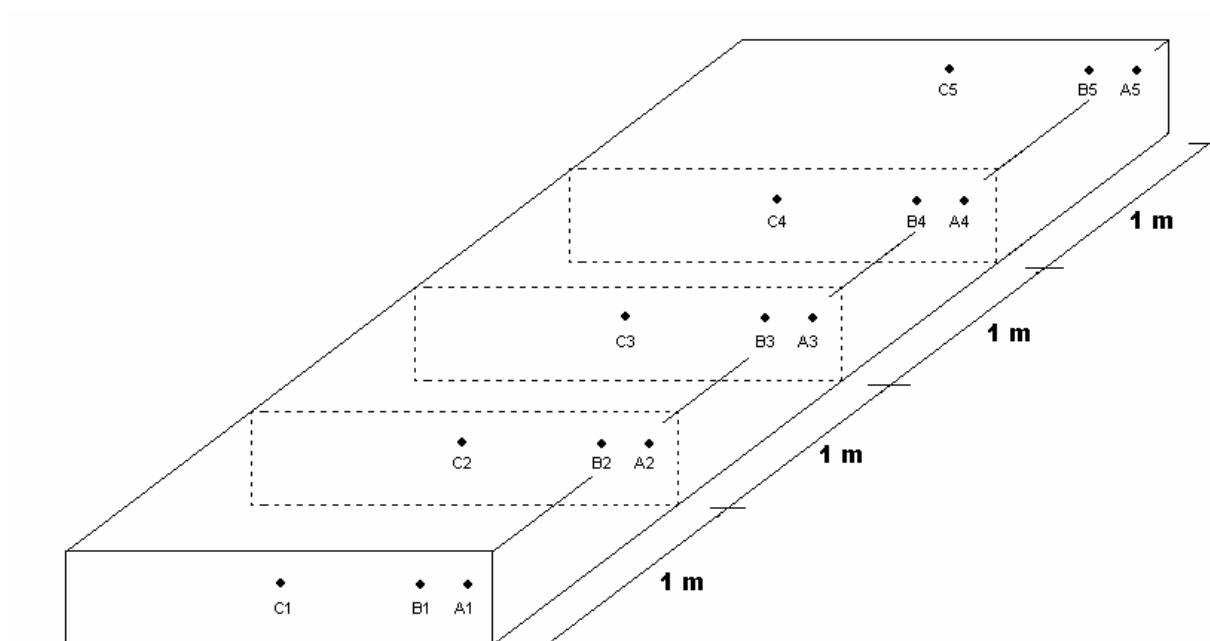


Figura 4.10: Figura esquemática do posicionamento das amostragens considerando seções transversais e longitudinais.

As amostras foram identificadas uma a uma para evitar trocas durante a etapa de análise química. Estas análises foram realizadas no laboratório químico da Aciaria da CST

A validação do modelo matemático de mistura no distribuidor envolveu a parte experimental e a simulação da mistura pelo modelo elaborado. O objetivo da validação do modelo foi realizar uma comparação entre os resultados do modelo matemático com os resultados de amostragem da placa de mistura obtida no lingotamento contínuo.

Os resultados da análise química das amostras retiradas na superfície, 7,5cm da superfície e centro da placa de mistura são apresentados no próximo capítulo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos com o modelo físico do distribuidor, os resultados do modelo matemático desenvolvido e os resultados de amostragem em placas de mistura.

Como citado anteriormente, os testes no modelo físico se fizeram necessários para gerar curvas de transição que pudessem ser alimentadas ao modelo matemático.

Por outro lado, foram realizadas simulações com o modelo matemático visando:

- validar o modelo desenvolvido utilizando os mesmos valores das variáveis típicas de troca de qualidades durante o lingotamento contínuo na planta industrial;
- analisar a influência de algumas variáveis de processo no comprimento da placa de mistura.

A seguir serão apresentados os resultados das simulações realizadas no modelo físico do distribuidor da CST.

5.1 – Resultados do Modelo Físico

Foram realizados testes, utilizando modelo físico em escala 1:3 do distribuidor da máquina de lingotamento contínuo nº 1 da CST, simulando o regime transiente de troca de placas com aços de diferentes categorias. Nos testes denominados “a frio” verte-se água salgada e fria sobre água fria, conforme detalhado na no Capítulo 4. Nos testes “a quente” o distribuidor é reenchido por um suprimento de água salgada e aquecida, que é vertida sobre água fria.

5.1.1 – Resultados dos Testes Transientes a Frio no Distribuidor

Nos testes a frio realizados, foram adotados os níveis mínimos de trabalho de 15 e 22 ton de volume de aço no protótipo, repetidos testes para duas vazões de trabalho, a saber, 8 e 10 ton/min

(o critério de similaridade de Froude foi empregado pra determinar os valores correspondentes no modelo). A razão entre vazão de reenchimento e vazão normal de lingotamento é parâmetro importante no processo, a ser controlado, e para os experimentos realizados foi revezada em 1,5 e 2,0 para cada seqüência de testes com as condições operacionais acima citadas.

Na Figura 5.1 apresenta-se um exemplo típico de curva de variação de vazão de alimentação de água (no modelo) durante o teste de transiência. Observa-se que a vazão de alimentação – 80 lpm – é reduzida a zero durante um período de tempo determinado (de esvaziamento do distribuidor), é elevada a 160 lpm durante o período de reenchimento, para depois retornar a 80 lpm. Neste exemplo, vide Tabela V.1 e Tabela V.2, o volume mínimo de trabalho foi de 116 litros (22 toneladas).

Curvas típicas de transição são apresentadas nas Figuras 5.2 e 5.3. Curvas de transição (curvas F), representam uma normalização das composições no intervalo (0,1), o primeiro valor indicando início e o segundo final de transição e são dadas por:

$$F = \frac{C - C_0}{C_1 - C_0} \quad (5.1)$$

sendo C_0 a concentração de um dado elemento de interesse referente à panela que se esgota, C_1 a concentração referente à panela que entra em regime de vazamento e C a variação temporal de composição na saída do veio. No caso do modelo as concentrações são substituídas pelo sinal de condutividade.

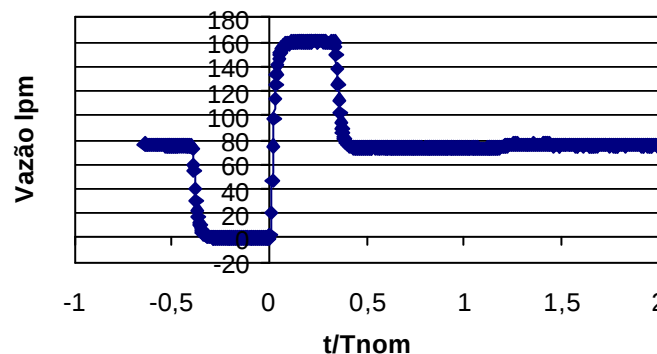


Figura 5.1: Vazão de entrada de líquido no distribuidor, em função do tempo adimensionalizado (modelo)

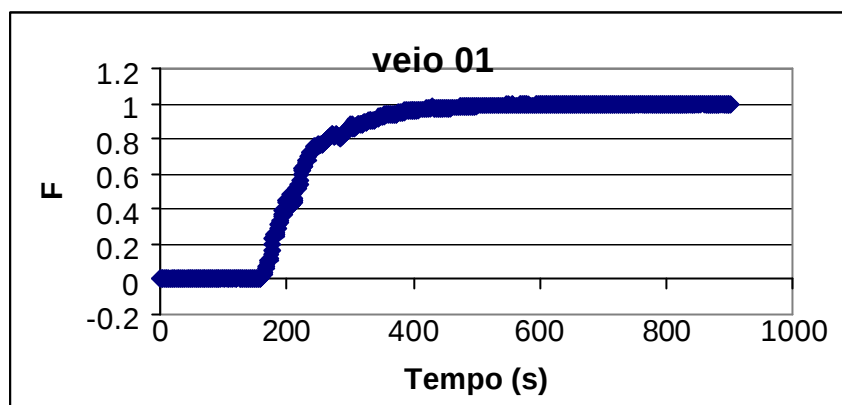


Figura 5.2 Curva de Transição: F vs t, veio 01

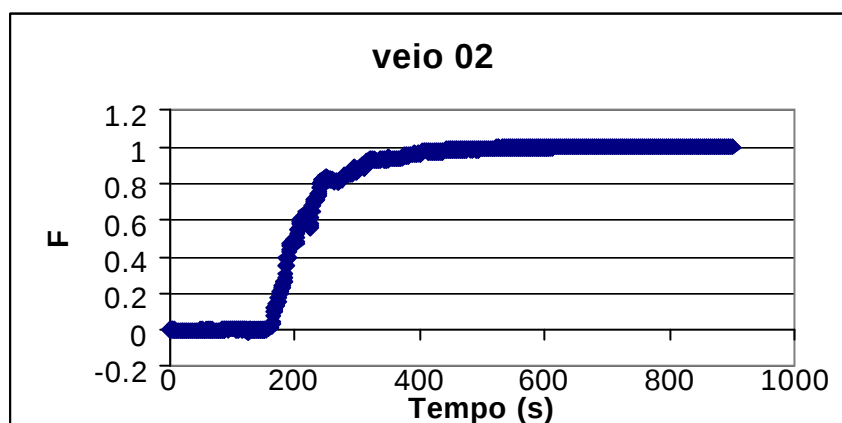


Figura 5.3: Curva de Transição: F vs t, veio 02

Em função da natureza turbulenta do fluxo, para cada condição operacional do distribuidor vários ensaios foram repetidos de modo a gerar uma curva média representativa da transição em cada veio para cada situação. A forma final de tal curva seria função de vazão de lingotamento, vazão de reenchimento, nível mínimo durante transição, volume normal de trabalho.

Na Tabela V.1 e Tabela V.2 o Tempo Mínimo representa o intervalo de tempo necessário, desde o re-início da alimentação, para que os sensores (de condutividade) apontem modificações sensíveis na composição do efluente, neste caso definida arbitrariamente como $F = 0,02$, ou 2% da transição. De modo semelhante o Volume de Descarte seria a quantidade de material lingotado em cada veio, entre as concentrações $F = 0,2$ (20% de transição) e $F = 0,7$ (70% de transição).

Estes valores são sabidamente arbitrários mas os parâmetros deles oriundos permitiriam caracterizar numericamente as assimetrias observadas nas curvas de transição.

Tabela V.1: Dados Gerais do modelo

		VEIO 1	VEIO 2
Nível de líquido		26,03 cm	
Volume de líquido		237,83 litros	
Vazão Nominal de entrada		79,42 l/min	
Vazão Nominal Reenchimento		147,75 l/min	
Tempo de Residência Nominal		2,94 min	
Tempo de Residência Reduzido		1,37 min	
Corte para Transição	Início	0,20	
	Fim	0,70	
Intervalos [s]	Drenagem	98,48	
	Reposição	94,31	
Ponto para Corte Volume Morto		2,00	
Volume Drenado [litros]		63,52	63,10
Volume Reposto [litros]		111,30	
Intervalo Descarte [litros]		57,51	56,62
Volume Descarte [litros]		37,47	36,33
Tempo mínimo 0,020 [s]		22,85	23,67
Tempo Mínimo - Regressão [s]		0,00	0,00
Volume Piston		0,28	0,29
Volume Morto a 2 Tnom		0,0149	0,0142
Volume Morto a 2 TnomR		0,1182	0,1232
Vazão média [l/min]		40,2	40,74

Tabela V.2: Dados Gerais da máquina industrial, critério de Froude

		VEIO 1	VEIO 2
Nível de líquido		0,78 m	
Volume de líquido		44,95 t	
Vazão Nominal de entrada		8,67 t/min	
Vazão Nominal Reenchimento		16,12 t /min	
Tempo de Residência Nominal		5,09 min	
Tempo de Residência Reduzido		2,38 min	
Corte para Transição	Início	0,20	
	Fim	0,70	
Intervalos [s]	Drenagem	170,57	
	Reposição	163,35	
Ponto para Corte Volume Morto		2,00	
Volume Drenado [toneladas]		12,00	11,93
Volume Reposto [toneladas]		21,04	
Intervalo Descarte [s]		99,61	98,07
Volume Descarte [toneladas]		7,08	6,87
Tempo mínimo 0,020 [s]		39,57	40,99
Tempo Mínimo - Regressão [s]		0,00	0,00
Volume Piston		0,28	0,29
Volume Morto a 2 Tnom		0,0149	0,0142
Volume Morto a 2 TnomR		0,1182	0,1232
Vazão média [t/min]		4,39	4,45

Nas tabelas 1 a 9 no anexo A são apresentados os resultados obtidos com o modelo, convertidos a escala da máquina industrial, e função das diversas configurações operacionais.

Foram também realizados testes com a prática operacional “holding”. Por “holding” entende-se a manutenção do nível mínimo de líquido no distribuidor durante um período de tempo pré-determinado. Em princípio esta prática levaria a uma transição mais brusca.

Arbitrou-se um tempo de holding (para o modelo) correspondente à media aproximada dos tempos mínimos determinada de acordo com os dados referentes ao transiente frio, sem holding., cerca de 30 s. Este valor, de acordo com o critério de Froude (fator de conversão para tempo, $\lambda^{1/2}$) corresponde a **51,96 Seg.** no protótipo.

Os resultados destes testes são apresentados nas Tabelas 10 a 18, no Anexo B.

Algumas conclusões podem ser inferidas a partir da análise destes resultados.

É notado, com relação ao throughput [ton/min], a pouca influência deste parâmetro, para ensaios com vazão de trabalho de 8 ton/min e 10 ton/min. Para os testes realizados com nível mínimo de 15 ton o volume de descarte é menor em relação aos testes realizados às mesmas condições e volume mínimo de 22 ton. Também é notado que para vazão de reenchimento duas vezes maiores do que a vazão de trabalho o volume de descarte é maior que quando essa razão é de 1,5.

Analisando as tabelas de resultados descritas se percebe que as constatações acima são válidas também para testes realizados com tempo de holding, sendo que a utilização dessa prática reduz o volume de descarte em média 13,52%.

5.1.2 – Resultados dos Testes Transientes Quente no Distribuidor

O objetivo deste aquecimento é possibilitar simular o diferencial de temperatura que se observa entre a panela que acaba de ser fechada ao final do vazamento e aquela que a substitui, num seqüencial. Essa condição indica a influência do fator de superaquecimento do aço, empregado na prática operacional, na curva de transição em estudo.

Os testes foram realizados, considerando-se a mesma configuração de barreiras escolhida anteriormente, além dos mesmos parâmetros operacionais do testes a frio, apresentados na Tabela V.3:

Tabela V.3: Parâmetros operacionais, do distribuidor da MLCI – CST, aplicados na realização dos testes (dados para modelo e protótipo).

Parâmetro	Protótipo	Modelo
Volume de trabalho:	45 t	238 l
Vazão de trabalho:	8,7 t/min	80 lpm
	10,9 t/min	100 lpm
Nível mínimo:	15 t	79 l
	22 t	116 l
Razão de reenchimento:	1,5 e 2,0	
Tempo de Holding:	0 s	0 s
	50 s	30 s

O grau de superaquecimento utilizado nos experimentos foi da ordem de 13° C (Ti, temperatura da água fria, 22°C; Tf, temperatura da água aquecida, 35°C). O critério de similaridade envolve a comparação entre a força de inércia do líquido que entra no distribuidor e a força de empuxo devida ao diferencial térmico. A depender da geometria do distribuidor, da presença e geometria de obstáculos ao fluxo e da razão citada anteriormente pode ser observada uma mudança de padrão de fluxo em relação aos testes transientes a frio. O adimensional resultante é a razão

$$\frac{r L^2 V^2}{L^3 g \Delta r} \quad (5.2)$$

e, após consideração de que as vazões no modelo e máquina industrial se relacionam de acordo com o critério de Froude se encontra,

$$(\beta \cdot \Delta T)_{\text{água}} = (\beta \cdot \Delta T)_{\text{aço}}. \quad (5.3)$$

Nesta expressão β representa o Coeficiente de Expansão Térmica, cujos valores são apresentados na Tabela V.4. Portanto o diferencial térmico de 13 °C corresponde a uma diferença de temperatura de duas painéis sequenciais da ordem de 25 °C.

Tabela V.4: Algumas propriedades relevantes do aço e da água

Propriedade	unidade	Água (25°C)	Aço (1600 °C)
Viscosidade dinâmica	Pa.s	1×10^{-3}	$6,4 \times 10^{-3}$
Massa específica	Kg.m ⁻³	1000	7080
Tensão superficial	N.m ⁻¹	0,0728	1,6
Coeficiente de expansão térmica	K ⁻¹	$7,3158 \times 10^{-6} \text{ T}[^{\circ}\text{C}]$ $+ 7,0899 \times 10^{-5}$	$1,26 \times 10^{-4}$

Os relativos aos experimentos no modelo do distribuidor, em testes transientes a quente, com e sem holding, estão disponíveis nas Tabelas 19 a 27 do Anexo C e Tabelas 28 a 36 do Anexo D.

5.2 – Modelamento Matemático da Transição no distribuidor.

Analisa-se, primeiramente, os dados providos dos testes de transição a frio.

Uma forma analítica das curvas de transição se faz necessária para implementar o modelo de solidificação no molde. A alimentação dessas curvas em um modelo de solidificação de aço no molde, depende da elaboração de uma equação semi-empírica que baseada nos resultados experimentais obtidos, possa modelar matematicamente as diferentes condições operacionais estudadas no distribuidor.

Como citado as curvas F representam uma normalização das composições no intervalo (0,1), o primeiro valor indicando início e o segundo final de transição e são dadas por:

$$F = \frac{C - C_0}{C_1 - C_0} \quad (5.4)$$

sendo C_0 a concentração de um dado elemento de interesse referente à panela que se esgota, C_1 a concentração referente à panela que entra em regime de vazamento e C a variação temporal de composição na saída do veio.

Como se observa a partir do exemplo das Figuras 5.2 e 5.3 o valor da função F é praticamente nulo até se atingir o valor de tempo mínimo, $T_{min}(2\%)$ e partir daí se pode assumir – como sugere uma análise preliminar dos resultados - uma função temporal do tipo:

$$f(x) = A + B * e^{-Cx^n} \quad (5.5)$$

Como estas devem ser normalizadas entre os valores 0 a 1 resulta que:

$$x = 0 \Rightarrow f(x) = 0 \quad (5.6)$$

$$x = \infty \Rightarrow f(x) = 1 \quad (5.7)$$

e logo:

$$\text{de (5.6) em (5.5)} \quad 0 = A + B \Rightarrow A = -B \quad (5.8)$$

$$\text{de (5.7) em (5.5)} \quad 1 = A + 0 \Rightarrow A = 1 \quad (5.9)$$

$$\text{de (5.9) em (5.8)} \quad 1 = -B \Rightarrow B = -1 \quad (5.10)$$

Portanto,

$$f(x) = 1 - e^{-Cx^n} \quad (5.11)$$

onde $f(x)$ representa a transição temporal normalizada de composição na saída de cada veio no distribuidor, C um parâmetro de ajuste representativo da condição operacional empregada, x o tempo e n um segundo parâmetro de ajuste.

A expressão anterior pode ser reescrita

$$f(x) = 1 - e^{-Cx^n} \quad (5.12)$$

$$\{1 - f(x)\} = e^{-Cx^n} \quad (5.13)$$

$$\ln\{1 - f(x)\} = -Cx^n \quad (5.14)$$

de modo a explicitar, através de regressão dos dados experimentais de transição, os parâmetros C e n. Observou-se que a curva proposta se ajusta bem aos dados experimentais quando se escolhe n igual a 1, vide por exemplo Figuras 5.4 e 5.5. Como se espera, nesta forma, é gerada uma reta que passa pela origem com inclinação correspondente ao valor de “C”.

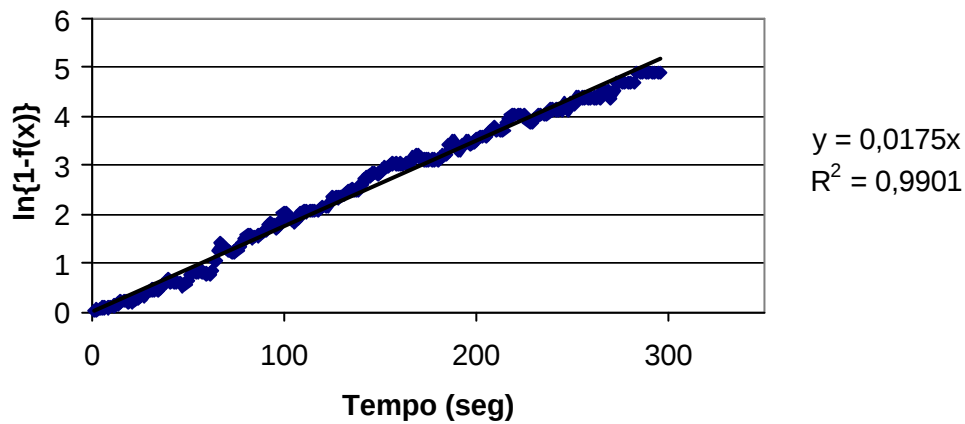


Figura 5.4: Gráfico de determinação da variável “C” do teste RS1210h4 (Q=8,81 ton/min, Qr=13,07 ton/min, f=1,48 e Nmín=15 ton), veio 01.

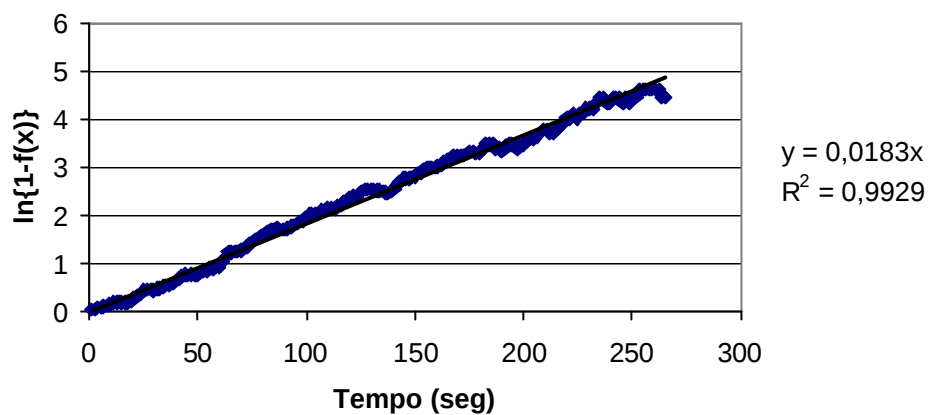


Figura 5.5: Gráfico de determinação da variável “C” do teste RS1210h4
(Q=8,81 ton/min, Qr=13,07 ton/min, f=1,48 e Nmín=15 ton), veio 02.

As Tabelas V.5 a V.20 apresentam os valores de “C” e respectivos coeficientes de correlação, estimados de acordo com o proposto e a partir das curvas de transição no modelo.

De posse destes resultados, o próximo passo consistiu em correlacionar as variações experimentadas pelo parâmetro “C” em função das condições operacionais. Empregou-se o programa MINITABTM para a obtenção da correlação múltipla.

Tabela V.5: Resultados dos testes transientes para determinação da variável “C” após análise gráfica
(seqüência: vazão de 8 ton/min, nível mínimo de 15 ton, taxa de reenchimento de 1,5 e holding igual a zero).

8015120	Condição				tempo mín. 0.020 (s)				holding (s)		Cte modelo V01		Cte modelo V 02	
Testes	Q(ton/min)	Qre(ton/min)	F	nível(ton)	V01 prot.	V02 prot.	V01 modelo	V02 modelo	protótipo	modelo	"C"	R ²	"C"	R ²
rs1017n1	8.51	12.59	1.4794	15	42.33	39	24.4392369	22.5166605	0	0	0.0204	0.9837	0.0205	0.9708
rs1017n2	8.38	12.66	1.5107	15	40.53	34.53	23.4000064	19.9359048	0	0	0.0212	0.9833	0.0213	0.9712
rs1017n3	8.64	12.63	1.4618	15	39.87	38.54	23.0189552	22.2510794	0	0	0.0205	0.9824	0.021	0.9645
rs1017n4	8.77	12.53	1.4287	15	42.63	35.59	24.612442	20.5478961	0	0	0.0203	0.9862	0.0206	0.9883
rs1017n5	8.59	12.55	1.461	15	39.96	37.21	23.0709168	21.4832035	0	0	0.0206	0.9857	0.0213	0.9762
rs1017n6	8.71	12.66	1.4535	15	40.72	34.64	23.509703	19.9994133	0	0	0.0208	0.9919	0.0221	0.9779
Média	8.6	12.6033333	1.4659	15	41.0067	36.585	23.67521	21.1223596	0	0	0.0206	0.98553	0.0211	0.9748
desvio padrão	0.140855	0.05573748	0.0275	0	1.19024	1.95146	0.68718427	1.12667505	0	0	0.0003	0.00344	0.0006	0.0081

Tabela V.6: Resultados dos testes transientes para determinação da variável “C” após análise gráfica
(seqüência: vazão de 8 ton/min, nível mínimo de 22 ton, taxa de reenchimento de 1,5 e holding igual a zero).

8022120	Condição				tempo mín. 0.020 (s)				holding (s)		Cte modelo V01		Cte modelo V 02	
Testes	Q(ton/min)	Qre(ton/min)	F	nível(ton)	V01 prot.	V02 prot.	V01 modelo	V02 modelo	protótipo	modelo	"C"	R ²	"C"	R ²
rs1001n1	8.68	12.41	1.4297	22	59.95	54.04	34.6121486	31.2000085	0	0	0.0174	0.9895	0.0168	0.9871
rs1001n2	8.52	12.46	1.4624	22	49.09	51.94	28.3421247	29.987573	0	0	0.0155	0.9792	0.0166	0.981
rs1001n3	8.6	12.5	1.4535	22	41.18	48.51	23.7752841	28.0072616	0	0	0.0152	0.9901	0.0166	0.9888
rs1001n4	8.44	12.42	1.4716	22	54.89	53.57	31.6907563	30.9286539	0	0	0.0159	0.9897	0.0164	0.9837
rs1001n5	8.49	12.46	1.4676	22	42.23	45.08	24.3815019	26.0269501	0	0	0.0151	0.9897	0.0164	0.9888
rs1001n6	8.36	12.48	1.4928	22	44.15	42.71	25.4900144	24.65863	0	0	0.0158	0.9899	0.0164	0.9886
Média	8.515	12.455	1.4629	22	48.5817	49.3083	28.0486383	28.4681795	0	0	0.0158	0.98802	0.0165	0.9863
desvio padrão	0.113798	0.03449638	0.0209	0	7.53738	4.68039	4.35170835	2.7022248	0	0	0.0008	0.00432	0.0002	0.0033

Tabela V.7: Resultados dos testes transientes para determinação da variável “C” após análise gráfica
(seqüência: vazão de 8 ton/min, nível mínimo de 15 ton, taxa de reenchimento de 2,0 e holding igual a zero).

8015160	Condição				tempo mín. 0.020 (s)				holding (s)		Cte modelo V01		Cte modelo V 02	
Testes	Q(ton/min)	Qre(ton/min)	F	nível(ton)	V01 prot.	V02 prot.	V01 modelo	V02 modelo	protótipo	modelo	"C"	R ²	"C"	R ²
rs1022n1	8.47	16.03	1.8926	15	43.09	36.53	24.8780231	21.0906053	0	0	0.0186	0.9531	0.0193	0.9308
rs1022n2	8.45	16.24	1.9219	15	44.53	33.86	25.7094075	19.5490801	0	0	0.0186	0.9323	0.0192	0.9179
rs1022n3	8.53	16.31	1.9121	15	40.34	37.77	23.2903099	21.8065197	0	0	0.0188	0.9508	0.0197	0.9388
rs1022n4	8.59	16.19	1.8847	15	42.52	33.01	24.5489334	19.0583324	0	0	0.018	0.9293	0.0188	0.9291
rs1022n5	8.41	16.2	1.9263	15	38.14	34.24	22.0201393	19.7684732	0	0	0.0185	0.9397	0.0186	0.9064
rs1022n6	8.52	16.15	1.8955	15	40.53	35.2	23.4000064	20.3227295	0	0	0.0182	0.9275	0.0183	0.8658
Média	8.495	16.1866667	1.9055	15	41.525	35.1017	23.9744699	20.2659567	0	0	0.0185	0.93878	0.019	0.9148
desvio padrão	0.06442	0.09395034	0.017	0	2.29442	1.77927	1.32468235	1.02726444	0	0	0.0003	0.01104	0.0005	0.0265

Tabela V.8: Resultados dos testes transientes para determinação da variável “C” após análise gráfica
(seqüência: vazão de 8 ton/min, nível mínimo de 22 ton, taxa de reenchimento de 2,0 e holding igual a zero).

8022160	Condição				tempo mín. 0.020 (s)				holding (s)		Cte modelo V01		Cte modelo V 02	
Testes	Q(ton/min)	Qre(ton/min)	F	nível(ton)	V01 prot.	V02 prot.	V01 modelo	V02 modelo	protótipo	modelo	"C"	R ²	"C"	R ²
rs1019n1	8.57	14.53	1.6954	22	63.64	59.46	36.7425711	34.329247	0	0	0.0148	0.9731	0.0151	0.9597
rs1019n2	8.67	16.12	1.8593	22	39.57	40.99	22.8457502	23.6655875	0	0	0.0142	0.9864	0.0147	0.9752
rs1019n3	8.69	15.92	1.832	22	38.33	42.52	22.1298358	24.5489334	0	0	0.0141	0.9869	0.0145	0.9813
rs1019n4	8.7	15.88	1.8253	22	43.75	39.57	25.2590743	22.8457502	0	0	0.0142	0.9745	0.0143	0.9719
rs1019n5	8.59	16.03	1.8661	22	53.66	42.6	30.9806154	24.5951215	0	0	0.0144	0.9774	0.0145	0.9761
rs1019n6	8.54	16.03	1.877	22	43.86	43.86	25.3225828	25.3225828	0	0	0.0143	0.9714	0.0144	0.9752
Média	8.626667	15.7516667	1.8259	22	47.135	44.8333	27.2134049	25.8845371	0	0	0.0143	0.97828	0.0146	0.9732
desvio padrão	0.068313	0.60462936	0.0669	0	9.71526	7.3171	5.60911015	4.22453101	0	0	0.0003	0.00677	0.0003	0.0073

Tabela V.9: Resultados dos testes transientes para determinação da variável “C” após análise gráfica
(seqüência: vazão de 10 ton/min, nível mínimo de 15 ton, taxa de reenchimento de 1,5 e holding igual a zero).

10015150	Condição				tempo mín. 0.020 (s)				holding (s)		Cte modelo V01		Cte modelo V 02	
Testes	Q(ton/min)	Qre(ton/min)	F	nível(ton)	V01 prot.	V02 prot.	V01 modelo	V02 modelo	protótipo	modelo	"C"	R ²	"C"	R ²
rs1029n7	10.84	15.24	1.4059	15	32.62	32.62	18.8331658	18.8331658	0	0	0.0258	0.9805	0.0253	0.9633
rs1029n2	10.32	15.68	1.5194	15	37.86	28.07	21.8584812	16.2062221	0	0	0.0255	0.9552	0.0251	0.9531
rs1029n3	10.39	15.61	1.5024	15	41.66	37.76	24.0524122	21.8007462	0	0	0.0256	0.9627	0.0259	0.972
rs1029n4	10.62	15.55	1.4642	15	37.67	33.77	21.7487846	19.4971186	0	0	0.0282	0.9846	0.0283	0.9905
rs1029n5	10.54	15.42	1.463	15	36.06	26.17	20.8192507	15.1092565	0	0	0.0272	0.9778	0.0264	0.9748
rs1029n6	10.51	15.59	1.4833	15	37.21	33.11	21.4832035	19.1160674	0	0	0.0256	0.9631	0.0264	0.961
Média	10.53667	15.515	1.473	15	37.18	31.9167	21.465883	18.4270961	0	0	0.0263	0.97065	0.0262	0.9691
desvio padrão	0.183376	0.15984367	0.0395	0	2.92649	4.17897	1.6896114	2.41273197	0	0	0.0011	0.01185	0.0011	0.0131

Tabela V.10: Resultados dos testes transientes para determinação da variável “C” após análise gráfica
(seqüência: vazão de 10 ton/min, nível mínimo de 22 ton, taxa de reenchimento de 1,5 e holding igual a zero).

10022150	Condição				tempo mín. 0.020 (s)				holding (s)		Cte modelo V01		Cte modelo V 02	
Testes	Q(ton/min)	Qre(ton/min)	F	nível(ton)	V01 prot.	V02 prot.	V01 modelo	V02 modelo	protótipo	modelo	"C"	R ²	"C"	R ²
rs1023n1	10.46	14.38	1.3748	22	40.25	36.72	23.2383483	21.2003019	0	0	0.019	0.9903	0.0184	0.986
rs1023n2	10.45	15.43	1.4766	22	40.72	40.72	23.509703	23.509703	0	0	0.0196	0.9824	0.0189	0.9766
rs1023n3	10.58	15.35	1.4509	22	43.67	43.67	25.2128863	25.2128863	0	0	0.0192	0.9801	0.0185	0.9773
rs1023n4	10.48	15.44	1.4733	22	39.68	39.68	22.9092587	22.9092587	0	0	0.019	0.9911	0.0183	0.9912
rs1023n5	10.44	15.37	1.4722	22	43.75	39.76	25.2590743	22.9554467	0	0	0.0197	0.9901	0.0188	0.9904
rs1023n6	10.43	15.42	1.4784	22	35.3	35.3	20.3804645	20.3804645	0	0	0.019	0.9851	0.0187	0.9893
Média	10.47333	15.2316667	1.4543	22	40.5617	39.3083	23.4182892	22.6946768	0	0	0.0193	0.98652	0.0186	0.9851
desvio padrão	0.055015	0.41873221	0.0402	0	3.11165	2.9707	1.79651298	1.71513427	0	0	0.0003	0.00465	0.0002	0.0066

Tabela V.11: Resultados dos testes transientes para determinação da variável “C” após análise gráfica
(seqüência: vazão de 10 ton/min, nível mínimo de 15 ton, taxa de reenchimento de 2,0 e holding igual a zero)

10015200	Condição				tempo mín. 0.020 (s)				holding (s)		Cte modelo V01		Cte modelo V 02	
Testes	Q(ton/min)	Qre(ton/min)	F	nível(ton)	V01 prot.	V02 prot.	V01 modelo	V02 modelo	protótipo	modelo	"C"	R ²	"C"	R ²
rs1115n1	10.9	18.69	1.7147	15	25.88	27.87	14.941825	16.090752	0	0	0.0246	0.9715	0.0232	0.944
rs1115n2	10.56	19.27	1.8248	15	23.32	25.3	13.4638083	14.6069618	0	0	0.0214	0.8714	0.0223	0.8744
rs1115n3	10.85	18.37	1.6931	15	29.78	27.79	17.193491	16.044564	0	0	0.0247	0.943	0.0242	0.943
rs1115n4	10.88	18.05	1.659	15	32.82	21.41	18.9486358	12.3610693	0	0	0.0267	0.9607	0.0238	0.9638
rs1115n5	10.75	18.86	1.7544	15	27.4	29.78	15.8193974	17.193491	0	0	0.0239	0.9248	0.024	0.9031
rs1115n6	10.84	17.7	1.6328	15	34.05	32.06	19.6587767	18.5098496	0	0	0.0255	0.9624	0.0241	0.9358
Média	10.79667	18.49	1.7131	15	28.875	27.3683	16.670989	15.8011146	0	0	0.0245	0.93897	0.0236	0.9274
desvio padrão	0.126912	0.56875302	0.0692	0	4.12714	3.68882	2.38280437	2.12974307	0	0	0.0018	0.03705	0.0007	0.0326

Tabela V.12: Resultados dos testes transientes para determinação da variável “C” após análise gráfica
(seqüência: vazão de 10 ton/min, nível mínimo de 22 ton, taxa de reenchimento de 2,0 e holding igual a zero).

10022200	Condição				tempo mín. 0.020 (s)				holding (s)		Cte modelo V01		Cte modelo V 02	
Testes	Q(ton/min)	Qre(ton/min)	F	nível(ton)	V01 prot.	V02 prot.	V01 modelo	V02 modelo	protótipo	modelo	"C"	R ²	"C"	R ²
rs1108n1	10.52	18.08	1.7186	22	32.16	34.15	18.5675847	19.7165117	0	0	0.0178	0.9848	0.0165	0.9709
rs1108n2	10.67	18.87	1.7685	22	36.63	26.45	21.1483404	15.2709146	0	0	0.0168	0.9205	0.016	0.9617
rs1108n3	10.74	18.06	1.6816	22	32.4	27.78	18.7061487	16.0387905	0	0	0.0183	0.9822	0.0173	0.9843
rs1108n4	10.72	17.7	1.6511	22	33.88	33.88	19.5606271	19.5606271	0	0	0.0189	0.9739	0.0181	0.9827
rs1108n5	10.65	18.71	1.7568	22	30.81	37	17.7881618	21.36196	0	0	0.0169	0.9674	0.0177	0.9614
rs1108n6	10.68	17.53	1.6414	22	28.46	30.72	16.4313887	17.7362003	0	0	0.0188	0.9793	0.0187	0.9752
Média	10.66333	18.1583333	1.703	22	32.39	31.6633	18.7003752	18.280834	0	0	0.0179	0.96802	0.0174	0.9727
desvio padrão	0.077632	0.53506697	0.0536	0	2.76377	4.06758	1.59566078	2.3484198	0	0	0.0009	0.0241	0.001	0.0099

Tabela V.13: Resultados dos testes transientes para determinação da variável “C” após análise gráfica
(seqüência: vazão de 8 ton/min, nível mínimo de 15 ton, taxa de reenchimento de 1,5 e holding de 51,96 seg).

8015120(30)	Condição				tempo mín. 0.020 (s)				holding (s)		Cte modelo V01		Cte modelo V 02	
Testes	Q(ton/min)	Qre(ton/min)	F	nível(ton)	V01 prot.	V02 prot.	V01 modelo	V02 modelo	protótipo	modelo	"C"	R ²	"C"	R ²
trat RS0212h1	8.62	13.06	1.5151	15	41.67	37.1	24.0581857	21.419695	55.46	32.02	0.0235	0.9921	0.0239	0.9832
trat RS0212h2	8.63	13.1	1.518	15	47.18	37.75	27.2393857	21.7949727	58.78	33.937	0.022	0.9775	0.0215	0.9736
trat RS0212h3	8.77	13.12	1.496	15	44.13	32.72	25.4784674	18.8909008	57.75	33.342	0.0238	0.9896	0.0237	0.9904
trat RS0212h4	8.85	12.04	1.3605	15	46.12	33.59	26.6273944	19.3931955	56.22	32.459	0.0236	0.9728	0.0237	0.9804
trat RS0212h5	8.81	13.07	1.4835	15	46.99	33.01	27.1296891	19.0583324	53.83	31.079	0.0235	0.9922	0.0235	0.9874
trat RS0212h6	8.61	13.13	1.525	15	41.68	34.35	24.0639592	19.8319817	55.48	32.031	0.0245	0.9884	0.0258	0.992
Média	8.715	12.92	1.483	15	44.6283	34.7533	25.7661803	20.0648464	56.253	32.478	0.0235	0.98543	0.0237	0.9845
Desvio padrão	0.107285	0.43197222	0.062	0	2.53007	2.15298	1.46073688	1.24302141	1.7734	1.0239	0.0008	0.00823	0.0014	0.0069

Tabela V.14: Resultados dos testes transientes para determinação da variável “C” após análise gráfica
(seqüência: vazão de 8 ton/min, nível mínimo de 22 ton, taxa de reenchimento de 1,5 e holding de 51,96 seg).

8022120(30)	Condição				tempo mín. 0.020 (s)				holding (s)		Cte modelo V01		Cte modelo V 02	
Testes	Q(ton/min)	Qre(ton/min)	F	nível(ton)	V01 prot.	V02 prot.	V01 modelo	V02 modelo	protótipo	modelo	"C"	R ²	"C"	R ²
trat RS1210h1	8.6	13	1.5116	22	56.22	44.23	32.4586321	25.5362024	52.23	30.155	0.0176	0.9833	0.0173	0.9882
trat RS1210h2	8.56	12.97	1.5152	22	42.9	45.19	24.7683265	26.0904587	56.03	32.349	0.0159	0.9818	0.0168	0.9842
trat RS1210h3	8.83	13.01	1.4734	22	42.33	44.61	24.4392369	25.7555955	54.02	31.188	0.0166	0.9856	0.0175	0.9888
trat RS1210h4	8.81	13.1	1.4869	22	58.21	55.93	33.6075592	32.2912006	55.93	32.291	0.0175	0.9901	0.0183	0.9929
trat RS1210h5	8.69	13	1.496	22	37.48	40.15	21.6390881	23.1806133	54.42	31.419	0.0158	0.9811	0.0172	0.9845
trat RS1210h6	8.75	12.98	1.4834	22	53.46	48.9	30.8651454	28.2324282	53.46	30.865	0.0173	0.9907	0.0178	0.9863
Média	8.706667	13.01	1.4944	22	48.4333	46.5017	27.962998	26.8477498	54.348	31.378	0.0168	0.98543	0.0175	0.9875
Desvio padrão	0.110393	0.0464758	0.0164	0	8.5945	5.39349	4.96203408	3.11393088	1.4642	0.8453	0.0008	0.00415	0.0005	0.0032

Tabela V.15: Resultados dos testes transientes para determinação da variável “C” após análise gráfica
(seqüência: vazão de 8 ton/min, nível mínimo de 15 ton, taxa de reenchimento de 2,0 e holding de 51,96 seg).

8015160(30)	Condição				tempo mín. 0.020 (s)				holding (s)		Cte modelo V01		Cte modelo V 02	
Testes	Q(ton/min)	Qre(ton/min)	F	nível(ton)	V01 prot.	V02 prot.	V01 modelo	V02 modelo	protótipo	modelo	"C"	R ²	"C"	R ²
trat RS0213h1	9.11	16.96	1.8617	15	35.76	35.76	20.6460456	20.6460456	56.6	32.678	0.0229	0.9812	0.0231	0.949
trat RS0213h2	8.65	16.89	1.9526	15	39.09	39.09	22.568622	22.568622	52.14	30.103	0.0233	0.9727	0.0246	0.968
trat RS0213h3	8.85	16.97	1.9175	15	45.57	38.05	26.3098518	21.9681777	53.08	30.646	0.023	0.9678	0.0244	0.9703
trat RS0213h4	8.55	16.93	1.9801	15	41.37	41.37	23.8849806	23.8849806	58.68	33.879	0.0245	0.9705	0.0276	0.9868
trat RS0213h5	8.83	17	1.9253	15	41.19	36.64	23.7810576	21.1541139	55.08	31.8	0.0219	0.96	0.0245	0.9558
trat RS0213h6	8.66	17.17	1.9827	15	43.09	40.91	24.8780231	23.6193995	55.18	31.858	0.0224	0.9733	0.0237	0.945
Média	8.775	16.9866667	1.9366	15	41.0117	38.6367	23.6780968	22.3068899	55.127	31.827	0.023	0.97092	0.0247	0.9625
desvio padrão	0.200175	0.0972968	0.0456	0	3.36247	2.25614	1.94132057	1.30258035	2.3627	1.3641	0.0009	0.00698	0.0016	0.0156

Tabela V.16: Resultados dos testes transientes para determinação da variável “C” após análise gráfica
(seqüência: vazão de 8 ton/min, nível mínimo de 22 ton, taxa de reenchimento de 2,0 e holding de 51,96 seg).

8022160(30)	Condição				tempo mín. 0.020 (s)				holding (s)		Cte modelo V01		Cte modelo V 02	
Testes	Q(ton/min)	Qre(ton/min)	F	nível(ton)	V01 prot.	V02 prot.	V01 modelo	V02 modelo	protótipo	modelo	"C"	R ²	"C"	R ²
trat RS0131h1	8.65	16.28	1.8821	22	51.1	64.99	29.5025988	37.521994	53.38	30.819	0.0156	0.9817	0.0164	0.9636
trat RS0131h2	8.73	16.9	1.9359	22	46.61	48.61	26.910296	28.0649966	60.69	35.039	0.0151	0.9686	0.0157	0.9655
trat RS0131h3	9.02	16.92	1.8758	22	53.85	44.05	31.090312	25.4322794	56.14	32.412	0.0156	0.9767	0.0153	0.9791
trat RS0131h4	8.62	16.78	1.9466	22	47.67	39.77	27.5222873	22.9612202	55.57	32.083	0.016	0.9791	0.0159	0.9787
trat RS0131h5	8.69	16.94	1.9494	22	46.61	46.61	26.910296	26.910296	54.32	31.362	0.0151	0.9781	0.0158	0.9778
trat RS0131h6	8.94	16.93	1.8937	22	41.95	41.95	24.2198438	24.2198438	54.51	31.471	0.0151	0.9919	0.0152	0.985
Média	8.775	16.7916667	1.9139	22	47.965	47.6633	27.6926057	27.5184383	55.768	32.198	0.0154	0.97935	0.0157	0.975
desvio padrão	0.165015	0.2574037	0.0337	0	4.10855	9.05784	2.37207012	5.22954513	2.5994	1.5008	0.0004	0.00758	0.0004	0.0085

Tabela V.17: Resultados dos testes transientes para determinação da variável “C” após análise gráfica
(seqüência: vazão de 10 ton/min, nível mínimo de 15 ton, taxa de reenchimento de 1,5 e holding de 51,96 seg).

10015150(30)	Condição				tempo mín. 0.020 (s)				holding (s)		Cte modelo V01		Cte modelo V 02	
Testes	Q(ton/min)	Qre(ton/min)	F	nível(ton)	V01 prot.	V02 prot.	V01 modelo	V02 modelo	protótipo	modelo	"C"	R ²	"C"	R ²
trat RS0304h1	10.85	16.28	1.5005	15	32.25	29.97	18.6195462	17.3031876	57.37	33.123	0.0318	0.9911	0.0301	0.9866
trat RS0304h2	10.52	16.26	1.5456	15	28.27	30.93	16.3216921	17.8574438	51.37	29.658	0.0336	0.9875	0.0338	0.9894
trat RS0304h3	10.86	16.39	1.5092	15	28.63	31.2	16.5295382	18.0133284	57.26	33.059	0.0306	0.9835	0.0309	0.978
trat RS0304h4	10.61	16.27	1.5335	15	29.2	31.3	16.8586279	18.0710634	50.89	29.381	0.0329	0.9829	0.0319	0.9929
trat RS0304h5	10.9	16.27	1.4927	15	34.54	32.25	19.9416783	18.6195462	54.99	31.748	0.0289	0.9846	0.0278	0.9879
trat RS0304h6	10.45	16.21	1.5512	15	33.31	26.26	19.2315375	15.1612181	52.33	30.213	0.0338	0.984	0.0317	0.9881
Média	10.69833	16.28	1.5221	15	31.0333	30.3183	17.9171034	17.5042979	54.035	31.197	0.0319	0.9856	0.031	0.9872
Desvio padrão	0.195491	0.05932959	0.0246	0	2.67333	2.11839	1.54344492	1.2230531	2.9098	1.68	0.0019	0.00313	0.002	0.005

Tabela V.18: Resultados dos testes transientes para determinação da variável “C” após análise gráfica
(seqüência: vazão de 10 ton/min, nível mínimo de 22 ton, taxa de reenchimento de 1,5 e holding de 51,96 seg)

10022150(30)	Condição				tempo mín. 0.020 (s)				holding (s)		Cte modelo V01		Cte modelo V 02	
Testes	Q(ton/min)	Qre(ton/min)	F	nível(ton)	V01 prot.	V02 prot.	V01 modelo	V02 modelo	protótipo	modelo	"C"	R ²	"C"	R ²
trat RS0303h1	10.88	16.25	1.4936	22	39.3	41.86	22.6898656	24.1678823	52.33	30.213	0.0187	0.9769	0.019	0.9841
trat RS0303h2	10.41	16.3	1.5658	22	37.78	35.11	21.8122932	20.270768	51.18	29.549	0.019	0.969	0.0184	0.9711
trat RS0303h3	10.59	16.2	1.5297	22	36.64	44.43	21.1541139	25.6516725	49.57	28.619	0.0199	0.9851	0.0197	0.9847
trat RS0303h4	10.47	16.1	1.5377	22	35.57	35.57	20.5363491	20.5363491	51.75	29.878	0.0207	0.9638	0.0198	0.9828
trat RS0303h5	11.1	16.32	1.4703	22	39.11	48.24	22.580169	27.851377	55.08	31.8	0.0198	0.977	0.0199	0.9795
trat RS0303h6	10.47	16.32	1.5587	22	35.3	37.59	20.3804645	21.7025966	51.67	29.832	0.0212	0.9836	0.021	0.986
Média	10.65333	16.2483333	1.526	22	37.2833	40.4667	21.5255425	23.3634409	51.93	29.982	0.0199	0.9759	0.0196	0.9814
Desvio padrão	0.276164	0.08635199	0.0373	0	1.7282	5.27296	0.9977753	3.04434485	1.8064	1.0429	0.001	0.00825	0.0009	0.0055

Tabela V.19: Resultados dos testes transientes para determinação da variável “C” após análise gráfica
(seqüência: vazão de 10 ton/min, nível mínimo de 15 ton, taxa de reenchimento de 2,0 e holding de 51,96 seg)

10015200(30)	Condição				tempo mín. 0.020 (s)				holding (s)		Cte modelo V01		Cte modelo V 02	
Testes	Q(ton/min)	Qre(ton/min)	F	nível(ton)	V01 prot.	V02 prot.	V01 modelo	V02 modelo	protótipo	modelo	"C"	R ²	"C"	R ²
trat RS0305h1	10.96	19.52	1.781	15	27.98	30.24	16.1542605	17.4590721	51.08	29.491	0.0276	0.9639	0.0277	0.966
trat RS0305h2	10.86	20.6	1.8969	15	29.5	32.16	17.0318329	18.5675847	50.72	29.283	0.0312	0.9779	0.0287	0.9718
trat RS0305h3	10.98	19.26	1.7541	15	31.49	28.84	18.18076	16.6507818	54.8	31.639	0.0282	0.9633	0.0269	0.9588
trat RS0305h4	10.81	20.26	1.8742	15	30.92	28.25	17.8516703	16.3101451	50.99	29.439	0.0352	0.9865	0.0326	0.9865
trat RS0305h5	10.95	19.09	1.7434	15	36.25	30.26	20.9289473	17.4706191	64.21	37.072	0.0283	0.9738	0.0281	0.9636
trat RS0305h6	10.52	19.75	1.8774	15	27.49	25.41	15.8713589	14.6704703	56.22	32.459	0.0325	0.9887	0.0323	0.9846
Média	10.84667	19.7466667	1.8212	15	30.605	29.1933	17.669805	16.8547789	54.67	31.564	0.0305	0.97568	0.0294	0.9719
Desvio padrão	0.172935	0.58500142	0.0691	0	3.18004	2.2962	1.83599837	1.32571323	5.2051	3.0052	0.003	0.01084	0.0024	0.0114

Tabela V.20: Resultados dos testes transientes para determinação da variável “C” após análise gráfica
(seqüência: vazão de 10 ton/min, nível mínimo de 22 ton, taxa de reenchimento de 2,0 e holding de 51,96 seg)

10022200(30)	Condição				tempo mín. 0.020 (s)				holding (s)		Cte modelo V01		Cte modelo V 02	
Testes	Q(ton/min)	Qre(ton/min)	F	nível(ton)	V01 prot.	V02 prot.	V01 modelo	V02 modelo	protótipo	modelo	"C"	R ²	"C"	R ²
trat RS0309h1	10.83	19.89	1.8366	22	42.33	54.04	24.4392369	31.2000085	49.38	28.51	0.0195	0.9798	0.0196	0.9607
trat RS0309h2	10.8	20.47	1.8954	22	37.67	39.76	21.7487846	22.9554467	52.22	30.149	0.0231	0.9851	0.0203	0.9845
trat RS0309h3	10.98	19.81	1.8042	22	42.98	42.98	24.8145146	24.8145146	52.13	30.097	0.0181	0.8095	0.0185	0.9693
trat RS0309h4	10.84	20.16	1.8598	22	39.96	44.62	23.0709168	25.761369	51.56	29.768	0.0243	0.9831	0.0245	0.9847
trat RS0309h5	11.04	19.4	1.7572	22	45.48	43.3	26.2578902	24.9992667	52.32	30.207	0.0207	0.9767	0.0198	0.9817
trat RS0309h6	10.86	19.91	1.8333	22	36.81	41.38	21.2522634	23.8907541	51.46	29.71	0.0217	0.9834	0.0208	0.9851
Média	10.89167	19.94	1.8311	22	40.8717	44.3467	23.5972678	25.6035599	51.512	29.74	0.0212	0.95293	0.0206	0.9777
Desvio padrão	0.095586	0.35810613	0.0473	0	3.32829	5.03661	1.9215876	2.90788965	1.1033	0.637	0.0023	0.07033	0.0021	0.0103

Admitiu-se uma relação funcional do tipo $C = K p V^{\alpha}$ onde K representa uma constante, V uma variável de processo, α um expoente característico da variável e π o operador produto. K e α são obtidas através da regressão múltipla após linearização resultante do operador logaritmo.

O Anexo E apresenta os resultados, passo a passo, da “stepwise regression”, considerando a média dos dois veios (desde que se assume condição de simetria), bem como também aqueles referentes aos veios individuais.

Estes resultados permitem a montagem da seguinte expressão que determina o valor calculado da variável “C”:

$$C_{\text{médio}} = e^{-4,0120} * n^{-0,888} * Q^{1,257} * (h+0,0001)^{0,0103} * (Q_{re})^{0,284} \quad (5.15)$$

onde n representa o nível mínimo durante troca de panelas, [litros]; Q a vazão total em regime permanente, [lpm]; h o tempo de holding, [s] e Q_{re} a vazão de reenchimento, [lpm].

A aplicabilidade dessa fórmula é verificada na Figura 5.6, onde se comparam valores calculados e experimentais.

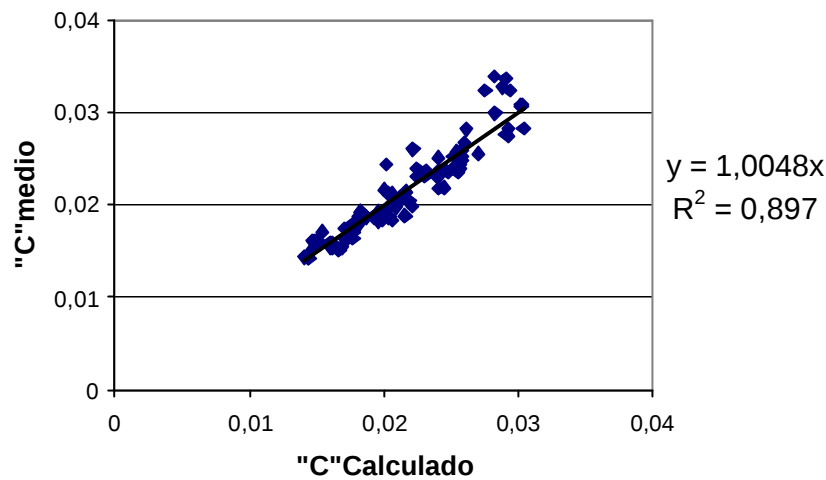


Figura 5.6: Gráfico de comparação dos valores de “C” médio calculado e experimental.

A complementação do estudo matemático da transição no distribuidor, durante o regime transiente de troca de placas com aços de diferentes categorias, depende ainda da elaboração de uma relação entre o tempo mínimo e os parâmetros operacionais.

Analogamente ao proposto na determinação da variável “C”, admitiu-se a aplicação da relação funcional do tipo $T_{\min} = K p V^{\alpha}$ onde K é uma constante, V uma variável de processo, α um expoente característico da variável e π operador produto. K e α são obtidas, também, através da regressão múltipla após linearização resultante da aplicação do operador logaritmo.

Os resultados obtidos, para os valores médios dos dois veios, via “stepwise regression” são apresentados no Anexo E. Resulta:

$$T_{\min} = e^{2,923} * C^{-0,59} * (h+0,0001)^{0,0110} * (Q_{re})^{0,42} \quad (5.16)$$

onde C representa uma variável de estudo, $[s^{-1}]$ (dependente de nível mínimo, vazão total em regime permanente, tempo de holding e vazão de reenchimento); h o tempo de holding, [s]; Q_{re} a vazão de reenchimento, [lpm].

Apresenta-se na Figura 5.7 uma comparação entre os valores calculados e experimentais.

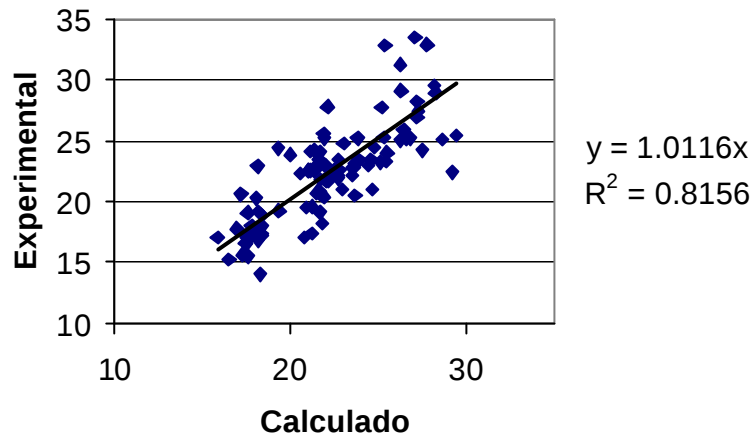


Figura 5.7: Comparação entre valores calculados e experimentais.

A mesma metodologia foi empregada para análise dos resultados dos testes transientes a quente.

Como sugerem as Figuras 5.8 e 5.9, a metodologia de tratamento de dados, para determinação da função representativa da variável “C” da curva “F” de transição, aplicada nos testes a frio, mostrou-se também eficiente para o tratamento dos testes a quente.

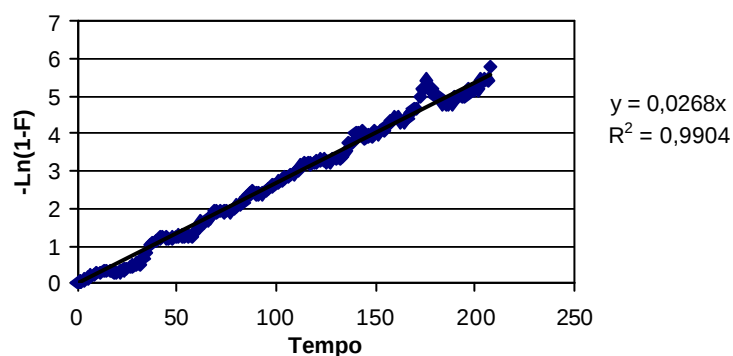


Figura 5.8: Gráfico de regressão linear para determinação do valor de “C” – Teste Rtt02q3 (veio 01).

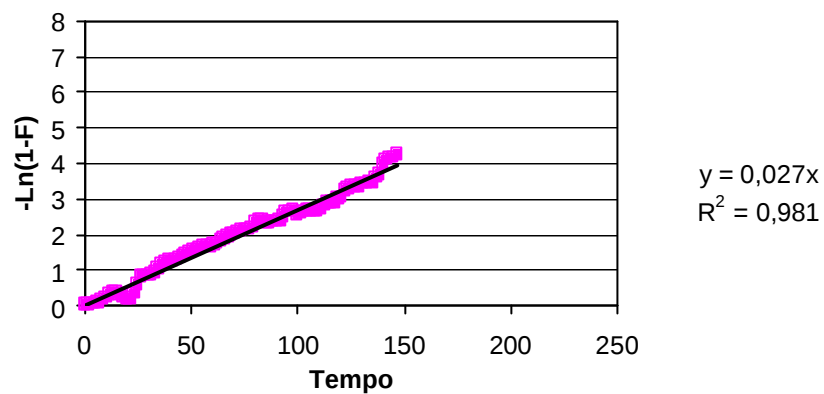


Figura 5.9: Gráfico de regressão linear para determinação do valor de “C” – Teste Rtt02q3 (veio 02).

Os resultados experimentais médios obtidos, referentes a tempo mínimo de residência $T_{min\ 0,02}$ e do parâmetro “C”, juntamente com suas respectivas condições operacionais, são mostrados na Tabela V.20.

Tabela V.20: Resultados médios experimentais de T_{min} 0,02 (protótipo) e “C” (modelo) para suas respectivas condições operacionais.

testes	Condição				tempo mín. 0.020 (s)		C _{te} modelo V01		C _{te} modelo V 02		holding (s)
	Q(t/min)	Q _{re} (t/min)	f	nível(t)	V01	V02	"C"	R ²	"C"	R ²	(tempo)
8015120	8,76	12,00	1,37	15	39,7	37,4	0,0366	0,94	0,0397	0,93	0
8022120	8,77	12,80	1,46	22	50,3	52,7	0,0211	0,97	0,0236	0,96	0
8015160	8,80	16,80	1,91	15	38,0	36,2	0,0313	0,96	0,0355	0,91	0
8022160	8,76	16,71	1,91	22	45,8	48,0	0,0184	0,97	0,0206	0,91	0
10015150	10,92	16,22	1,49	15	32,1	31,6	0,0466	0,94	0,0465	0,92	0
10022150	10,84	16,07	1,48	22	38,4	41,3	0,0269	0,98	0,0289	0,97	0
10015200	10,89	20,38	1,87	15	27,5	28,7	0,0352	0,94	0,0407	0,89	0
10022200	10,87	20,06	1,84	22	34,8	33,9	0,0226	0,98	0,0237	0,93	0
8015120(30)	8,77	13,43	1,53	15	46,2	43,9	0,0267	0,96	0,0301	0,93	52,8
8022120(30)	8,71	13,47	1,55	22	55,6	57,3	0,0212	0,98	0,0238	0,98	51,5
8015160(30)	8,78	17,48	1,99	15	42,1	42,0	0,0318	0,96	0,0350	0,93	51,8
8022160(30)	8,74	17,25	1,97	22	54,6	60,7	0,0201	0,97	0,0232	0,93	54,0
10015150(30)	10,92	16,65	1,52	15	34,3	34,8	0,0433	0,94	0,0424	0,91	52,4
10022150(30)	10,91	16,76	1,54	22	42,9	49,0	0,0287	0,98	0,0304	0,98	54,3
10015200(30)	10,88	21,60	1,99	15	37,0	35,3	0,0439	0,95	0,0424	0,90	53,7
10022200(30)	10,95	21,69	1,98	22	45,9	44,1	0,0309	0,97	0,0328	0,95	53,9

Da aplicação da análise estatística, de correlações múltiplas das variações de $T_{min\ 0,02}$ e “C” em função das condições operacionais, através da utilização da *stepwise regression* do MINITABTM, obteve-se as seguintes expressões, para o valor médio no modelo, considerando condição de simetria entre os veios 01 e 02:

$$T_{min\ 0,02} = e^{5,1561} * n^{0,566} * Q^{-0,858} * h^{0,0496} * (Q_{re})^{-0,160} \quad R^2 = 0,91 \quad (5.17)$$

$$C = e^{-3,659} * n^{-1,038} * Q^{1,380} * h^{0,0095} * (Q_{re})^{-0,259} \quad R^2 = 0,89 \quad (5.18)$$

onde n representa o nível mínimo durante troca de painéis, [litros]; Q a vazão total em regime permanente, [lpm]; h o tempo de holding, [s] e Q_{re} a vazão de reenchimento, [lpm].

A aplicabilidade dessas fórmulas é verificada nas Figuras 5.10 e 5.11, onde se comparam valores calculados e experimentais.

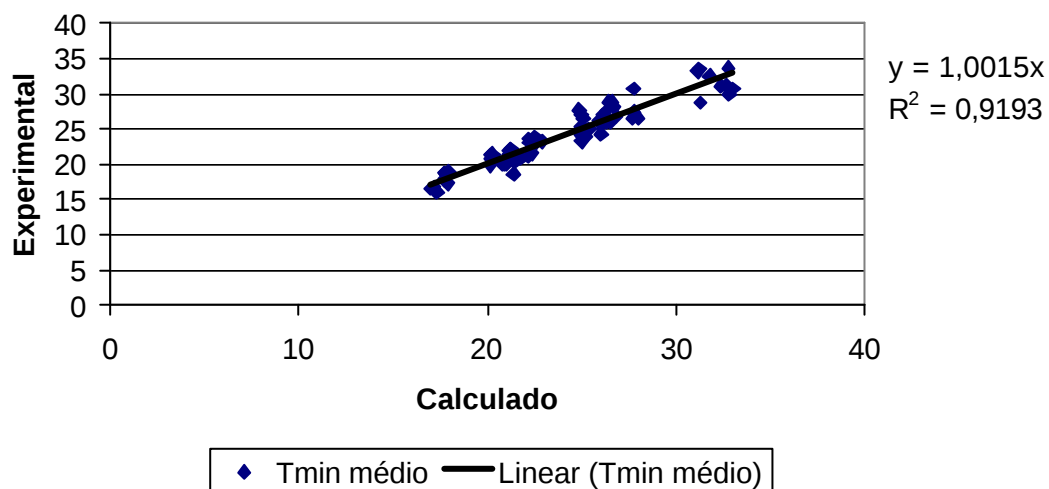


Figura 5.10: Gráfico comparativo dos valores experimentais e calculados de $T_{min\ 0,02}$ (média veios 01 e 02).

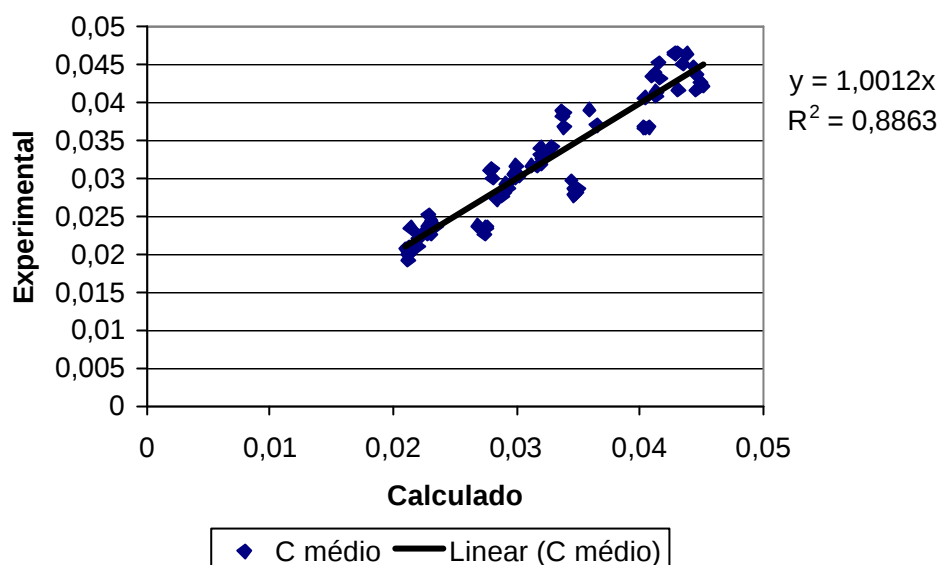


Figura 5.11: Gráfico comparativo dos valores experimentais e calculados de “C” (média veios 01 e 02).

A determinação do parâmetro “C”, pela stepwise regression, sugere ainda uma expressão para “C” sem a inclusão da variável h. Essa alternativa demonstra-se igualmente eficiente, o que pode ser observado pelo mesmo valor de R² explicito na expressão seguinte e pela figura 5.12.

$$C = e^{-3,693} * n^{-1,035} * Q^{1,362} * (Qre)^{-0,235} \quad R^2 = 0,89 \quad (5.19)$$

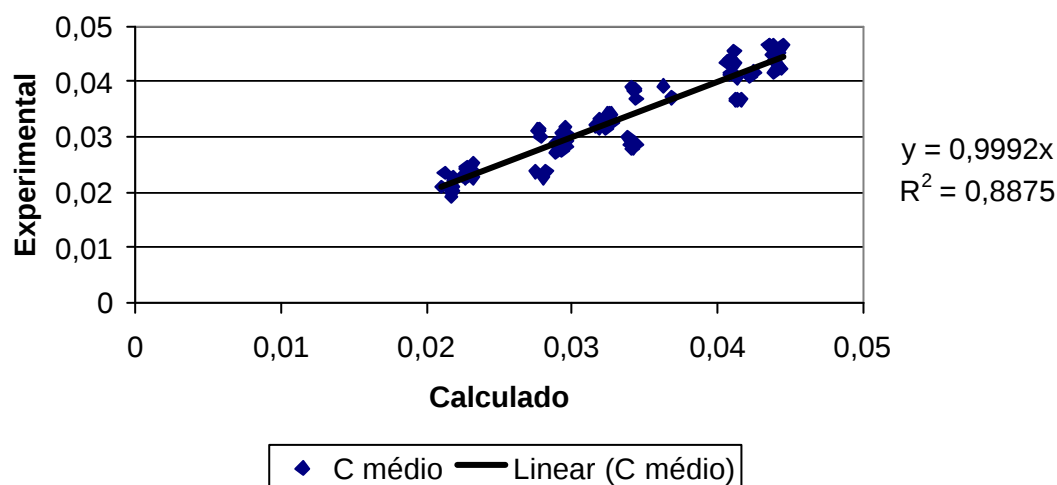


Figura 5.12: Gráfico comparativo dos valores experimentais e calculados de “C”, excluindo variável “h” (média veios 01 e 02).

Os resultados, de cada etapa da *stepwise regression*, após aplicação do argumento do operador logarítmico, para T_{min} 0,02 e “C”, de cada veio e valor médio, são apresentados no Anexo F.

Os resultados mostraram também que o valor experimental de “C” para os testes realizados a quente são em média 47,67% maiores que os valores obtidos nos testes a frio. Isso indica que a transição ocorre de maneira mais brusca quando se considera o fator de superaquecimento. Não se percebe, no entanto, diferença significativa para o valor de T_{min} (2% de transição) quando se prossegue com tal comparação.

Estas constatações podem ser observadas nos gráficos das Figuras 5.13 e 5.14, que apresentam valores médios de cerca de 6 replicatas; o significado das legendas pode ser encontrado na Tabela 8.

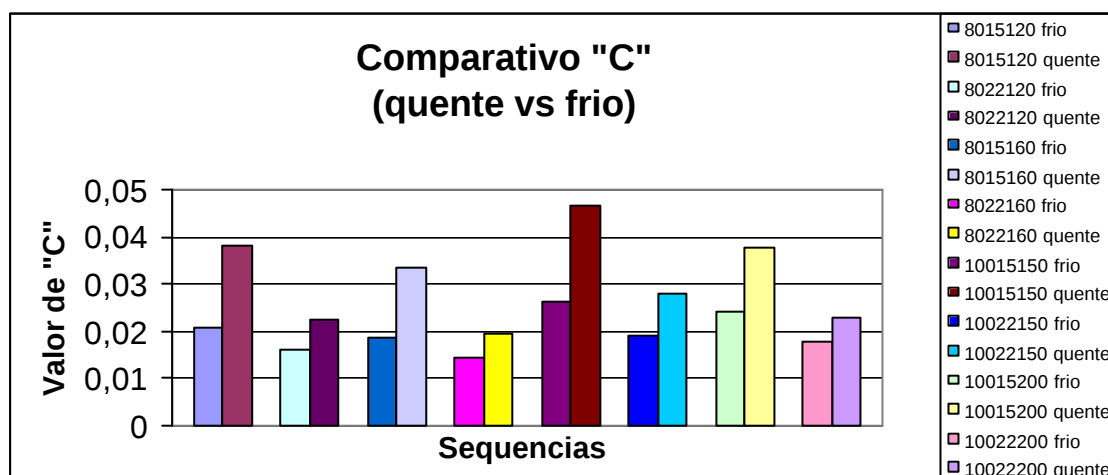


Figura 5.13: Gráfico comparativo dos valores experimentais de “C” para os testes realizados a quente e a frio.

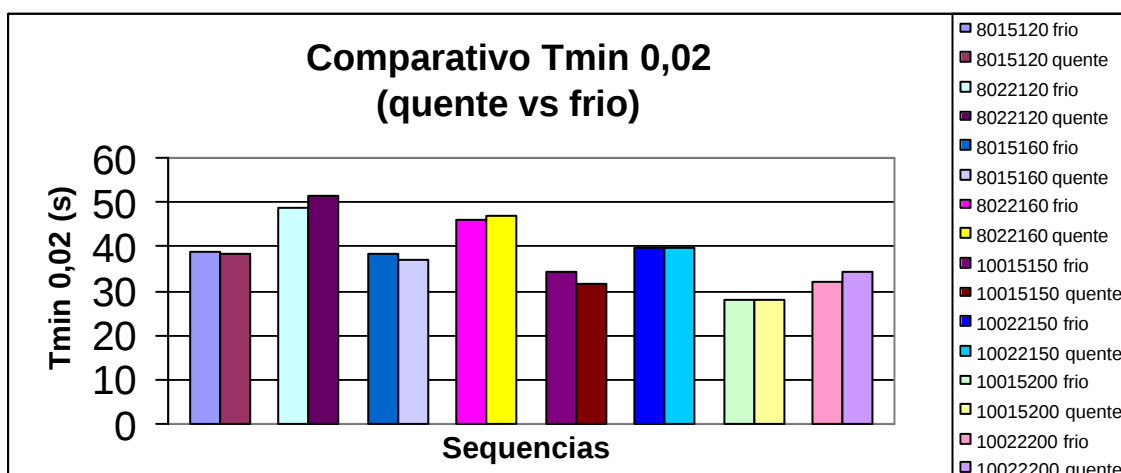


Figura 5.14: Gráfico comparativo dos valores experimentais de T_{min} 0,02 para os testes realizados a quente e a frio.

5.2.1 – Análise da Influência de Algumas Variáveis de Operação Sobre Comprimento da Placa de Mistura

Algumas variáveis operacionais de lingotamento contínuo interferem de forma significativa na extensão do processo de mistura e, conseqüentemente, no comprimento final da placa de mistura. Assim sendo, conhecer as influências dessas variáveis no procedimento de troca de qualidades pode contribuir de forma significativa para minimizar o descarte, promovendo ganhos de rendimento na Aciaria. Dentre as variáveis de lingotamento contínuo, as principais que interferem diretamente na mistura de aços, conforme Huang e Thomas (1996), Silva e colaboradores (2003), Costa e colaboradores (2004) e Yu e Dickinson (2005), são o peso de aço no distribuidor no momento da troca de qualidades, a taxa de enchimento do distribuidor, taxa de extração da placa (throughput) e projeto do distribuidor. A variável, projeto do distribuidor, não é objeto deste estudo, pois o modelo gerado considera o projeto de distribuidor atual da máquina de lingotamento contínuo nº1 da CST.

A seguir serão apresentados os resultados encontrados através de simulações realizadas no modelo matemático, avaliando o efeito das principais variáveis citadas e, influência do “holding” e gradiente de temperatura entre as corridas.

5.2.1.1 – Influência do Peso de Aço do Distribuidor no Comprimento da Placa de Mistura

Uma das variáveis que mais influenciam a extensão da zona de mistura no distribuidor durante lingotamento contínuo com troca de qualidade é o peso de aço no distribuidor no momento da abertura da panela contendo a corrida seguinte. Esse peso de aço define o volume inicial no modelo matemático elaborado e, conseqüentemente, os volumes de cada uma das regiões de escoamento pistão, morto e mistura.

Na prática industrial procura-se abaixar ao máximo o volume de aço no distribuidor no momento de se iniciar a mistura, sem, contudo correr risco de formação de vórtex e, conseqüentemente, de passagem de escória do distribuidor para o molde. Esse risco é que limita o volume mínimo de aço no distribuidor para realização da troca de qualidades no lingotamento contínuo.

Para o projeto atual do distribuidor da máquina de lingotamento contínuo nº1 foram simuladas três situações de volume de aço no distribuidor no momento de abertura da nova panela. Conforme demonstrado na Tabela V.21

Tabela V.21: Dados utilizados nas simulações para avaliar a influência do peso de aço no distribuidor no comprimento da placa de mistura

SIMULAÇÃO	1	2	3
Volume mínimo distribuidor [t]	15	22	30
Volume Trabalho Distribuidor [t]	45	45	45
Velocidade lingotamento [m/min]	1,5	1,5	1,5
Espessura [mm]	225	225	225
Largura [mm]	1200	1200	1200
Superaquecimento[°C]	0,0	0,0	0,0
Taxa reenchimento	3,0	3,0	3,0
Holding, ao volume minimo [s]	0,0	0,0	0,0
Constante solidificação [$\text{mm}^2 \text{min}^{-1}$]	26	26	26

A Figura 5.15 apresenta as curvas obtidas para as diferentes condições de simulação propostas na tabela XXVII.

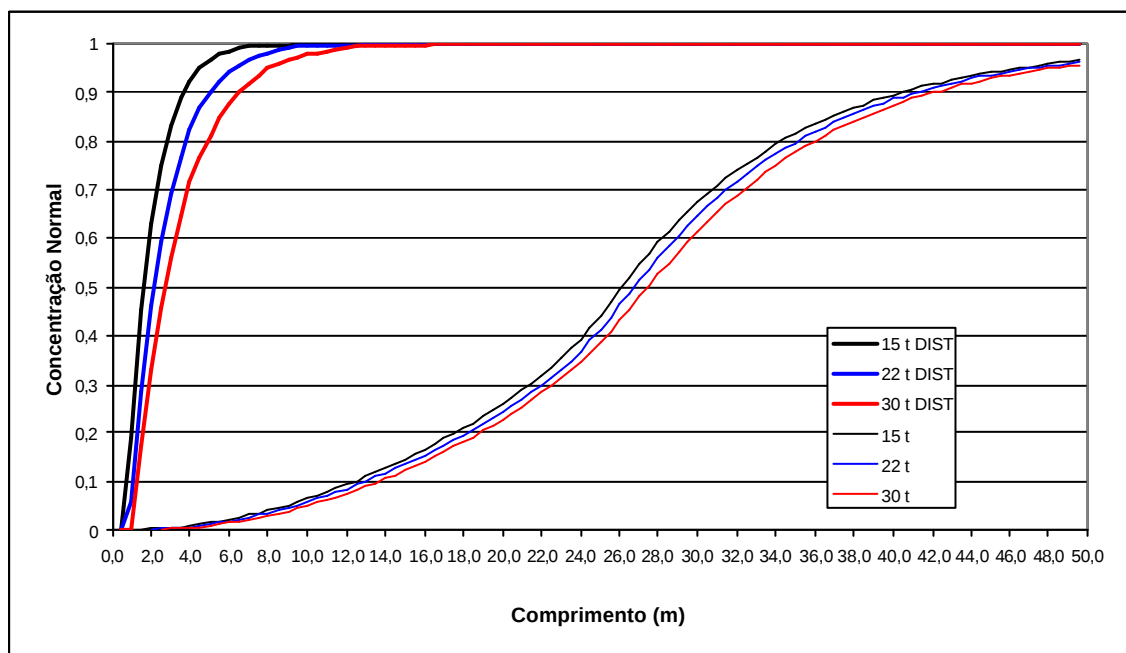


Figura 5.15: Análise da Influência do peso de aço no distribuidor no comprimento da mistura, curvas de distribuidor e molde.

Conforme pode ser observado na Figura 5.15, a medida que diminui-se o volume de aço no distribuidor no momento de abertura da nova panela a transição no distribuidor se torna mais brusca. Deve-se notar, entretanto que qualquer modificação provinda do distribuidor tende a ser diluída no aço contido na poça líquida no molde. Deste modo a transição mais brusca no distribuidor pode não ser transmitida com a mesma intensidade para o molde. Este seria o caso desta análise. Pode-se observar que a diminuição do volume do aço no distribuidor no momento de abertura da nova panela, gera, tanto no distribuidor (de forma mais intensa) quanto no molde uma diminuição no comprimento da placa de mistura. Isso pode ser melhor observado pelos resultados numéricos provenientes do modelo (assumindo que a placa de transição se encontra entre os limites $F=0,2$ e $F=0,7$) : para o caso onde o volume mínimo de aço no distribuidor atingido foi de 15 t o comprimento da placa de mistura seria de 21,75 metros; por outro lado, para volumes mínimos de 22 e 30t seriam observados resultados de 22,05 e 22,25 metros respectivamente. Esta pequena diferença deve ser creditada à diluição do aço provindo do distribuidor naquele contido na poça de líquido no molde, que pode ser bastante longa. Até o presente momento foi assumido que todo o líquido no molde participa efetivamente no processo de mistura, o que amplifica o poder de diluição da poça.

Assim sendo, deve-se visar realizar o procedimento de troca de qualidades no lingotamento contínuo com o menor volume de aço no distribuidor, para assim, minimizar o descarte. Os mesmo tipo de resultado foi encontrado por Huang e Thomas (1996), Silva e colaboradores (2003), Costa e colaboradores (2004).

5.2.1.2 – Influência da Taxa de enchimento do Distribuidor no Comprimento da Placa de Mistura

A taxa de enchimento do distribuidor também pode ter um efeito significativo na troca de qualidades no distribuidor durante a operação de lingotamento contínuo. Esta representa a razão entre vazões volumétricas correspondentes ao novo aço que está entrando no distribuidor e do aço antigo que vai deixando o mesmo.

A Tabela V.22 apresenta os valores utilizados para a simulação para analisar a influencia da taxa de reenchimento no comprimento da placa de mistura.

Tabela V.22: Dados utilizados nas simulações para avaliar a influência da taxa de reenchimento de aço no distribuidor no comprimento da placa de mistura

SIMULAÇÃO	1	4
Volume mínimo distribuidor [t]	15	15
Volume Trabalho Distribuidor [t]	45	45
Velocidade lingotamento [m/min]	1,5	1,5
Espessura [mm]	225	225
Largura [mm]	1200	1200
Superaquecimento[°C]	0,0	0,0
Taxa reenchimento	3,0	1,5
Holding, ao volume mínimo [s]	0,0	0,0
Constante solidificação [$\text{mm}^2 \text{min}^{-1}$]	26	26

A Figura 5.16 apresenta os resultados das simulações.

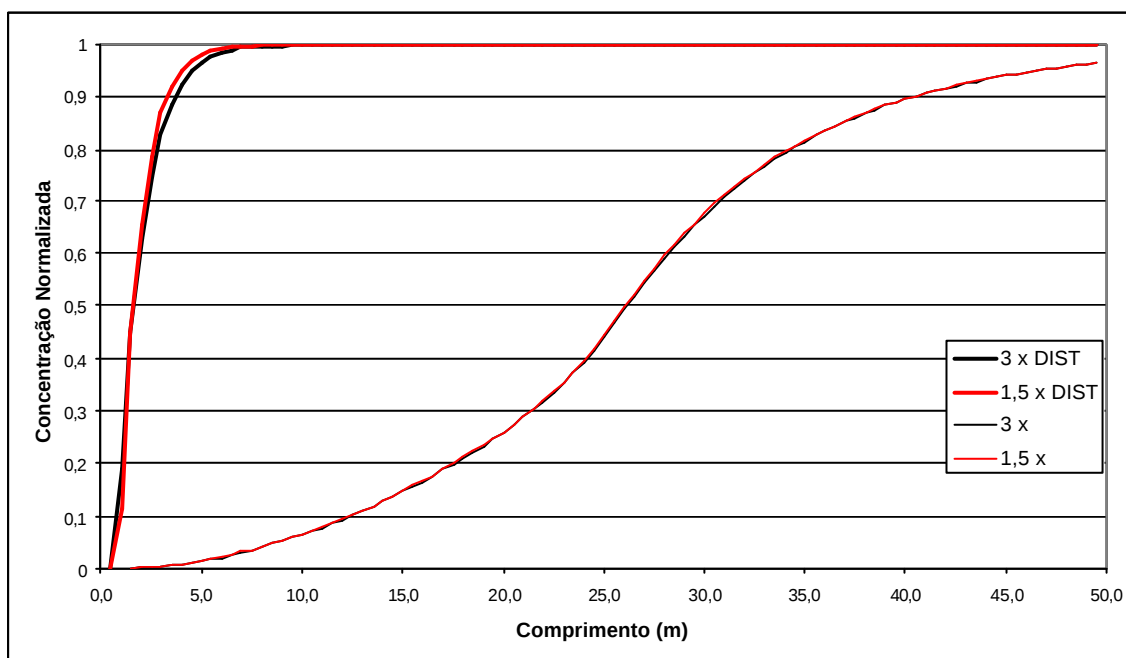


Figura 5.16: Análise da Influência da taxa de reenchimento de aço no distribuidor no comprimento da mistura, curvas de distribuidor e molde.

Os resultados encontrados, apresentados na Figura 5.16, mostram que apesar de uma pequena diferença na curva de mistura do distribuidor a taxa de reenchimento do distribuidor não tem influência significativa no comprimento final da placa de mistura. O comprimento encontrado

para a taxa de reenchimento de 3 vezes é de 21,75 metros contra 21,65 metros quando se considera taxa de reenchimento igual a 1,5. Estes valores são obtidos assumindo transição entre $F=0,2$ e $F=0,7$

5.2.1.3 – Influência da Taxa de extração do Distribuidor no Comprimento da Placa de Mistura

A velocidade de lingotamento influencia nos resultados do modelo matemático da mistura no distribuidor, pois da mesma forma que as dimensões do molde, alteram a vazão de saída de aço do distribuidor, throughput. Thomas (1997) analisou o efeito da largura e espessura da placa, para uma velocidade constante, no comprimento da placa de mistura. Para este trabalho foram analisadas variações na velocidade de lingotamento, para dimensões de placas, espessura e largura, constantes. Com o objetivo de avaliar a influência da taxa de extração de aço do distribuidor no comprimento da placa de mistura foram realizadas 3 simulações conforme apresentado na Tabela V.23.

Tabela V.23: Dados utilizados nas simulações para avaliar a influência da taxa de extração de aço no distribuidor no comprimento da placa de mistura

SIMULAÇÃO	1	5	6
Volume mínimo distribuidor [t]	15	15	15
Volume Trabalho Distribuidor [t]	45	45	45
Velocidade lingotamento [m/min]	1,5	1,0	2,0
Espessura [mm]	225	225	225
Largura [mm]	1200	1200	1200
Superaquecimento[°C]	0,0	0,0	0,0
Taxa reenchimento	3,0	3,0	3,0
Holding, ao volume mínimo [s]	0,0	0,0	0,0
Constante solidificação [$\text{mm}^2 \text{min}^{-1}$]	26	26	26

A Figura 5.17 apresenta os resultados das simulações.

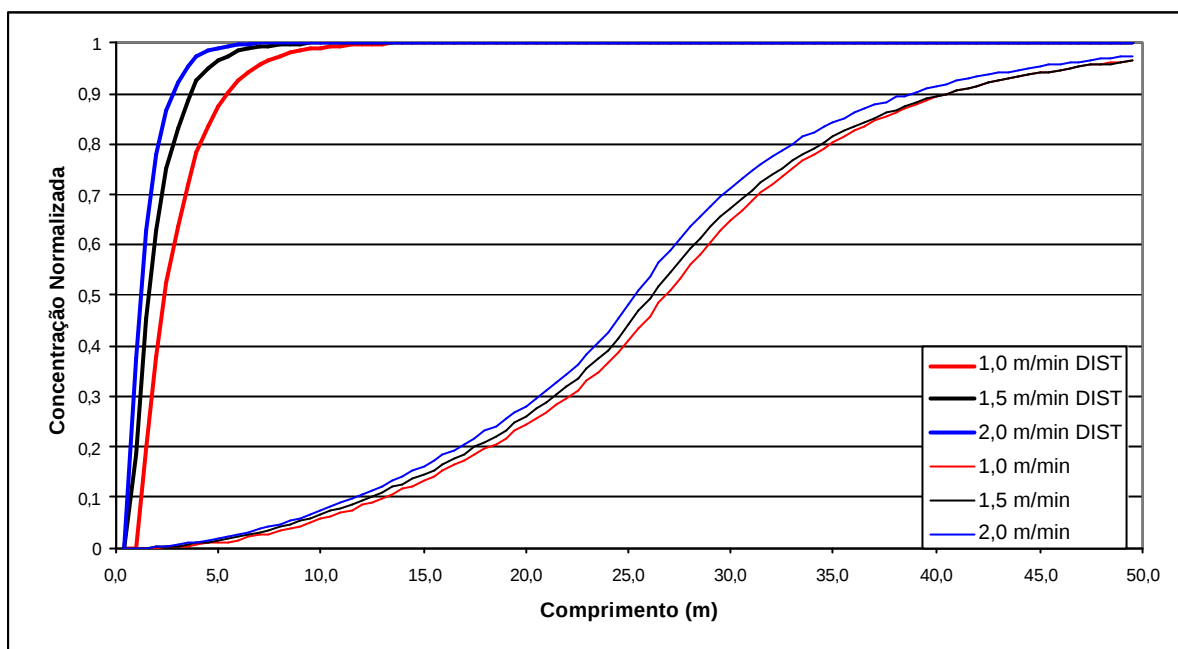


Figura 5.17: Análise da Influência da taxa de extração de aço no distribuidor no comprimento da mistura, curvas de distribuidor e molde.

Conforme pode ser observado na Figura 5.17, à medida que aumenta-se a taxa de extração de aço do distribuidor, a transição no distribuidor se torna mais brusca entretanto porém devido a diluição devido a poça líquida do molde a transição no molde não apresenta mesma intensidade. De fato nota-se que o efeito sobre as curvas de transição no molde é, na prática, de translação no sentido da esquerda quando aumenta a velocidade de 1,0m/min, para 1,5m/min e 2,0 m/min; os intervalos de descarte (considerando $F=0,2$ e $F=0,7$) são quase iguais, 869,923s, 845,761s e 811,585s, respectivamente. Os comprimentos da mistura previstos pelo modelo para as velocidades de lingotamento de 1,0m/min, 1,5m/min e 2,0m/min alcançam 14,50 metros (869,923s), 21,75 metros (845,761s) e 27,06 metros (811,585s) respectivamente. Assim sendo, para minimizar o comprimento de mistura deveria ser visada uma menor velocidade de lingotamento. Este resultado aparentemente surpreendente é gerado pelo modelo porque esta simulação considerou que as condições de extração de calor na máquina fossem mantidas constantes; como se nota admitiu-se constante de solidificação igual a 26. Deste modo maiores velocidades resultariam em maiores volumes de poça líquida no molde, por exemplo $0,64\text{m}^3$ a 1,0m/min, 1m^3 a 1,5m/min e $1,22\text{m}^3$ a 2,0m/min, o que implicaria em maior volume de material misturado no molde e, por consequência, uma transição mais lenta. Na prática industrial variações importantes de velocidade não podem ser realizadas sem a adequação do perfil de resfriamento nas zonas primária, secundária e terciária de trocas térmicas. Na situação mais simples o aumento de

velocidade da máquina pode requerer maior intensidade de resfriamento para evitar que porções pastosas ou líquidas dos veios atinjam a zona de corte.

5.2.1.4 – Influência da prática de “holding” no Comprimento da Placa de Mistura

Conforme citado anteriormente, entende-se por “holding” a manutenção do nível mínimo de líquido no distribuidor durante um período de tempo pré-determinado.

A Tabela V.24 apresenta os valores utilizados para a simulação para analisar a influencia da prática de “holding” no comprimento da placa de mistura.

Tabela V.24: Dados utilizados nas simulações para avaliar a influência da prática de “holding” no distribuidor no comprimento da placa de mistura

SIMULAÇÃO	1	7
Volume mínimo distribuidor [t]	15	15
Volume Trabalho Distribuidor [t]	45	45
Velocidade lingotamento [m/min]	1,5	1,5
Espessura [mm]	225	225
Largura [mm]	1200	1200
Superaquecimento[°C]	0,0	0,0
Taxa reenchimento	3,0	3,0
Holding, ao volume minimo [s]	0,0	50,0
Constante solidificação [$\text{mm}^2 \text{min}^{-1}$]	26	26

A Figura 5.18 apresenta os resultados das simulações.

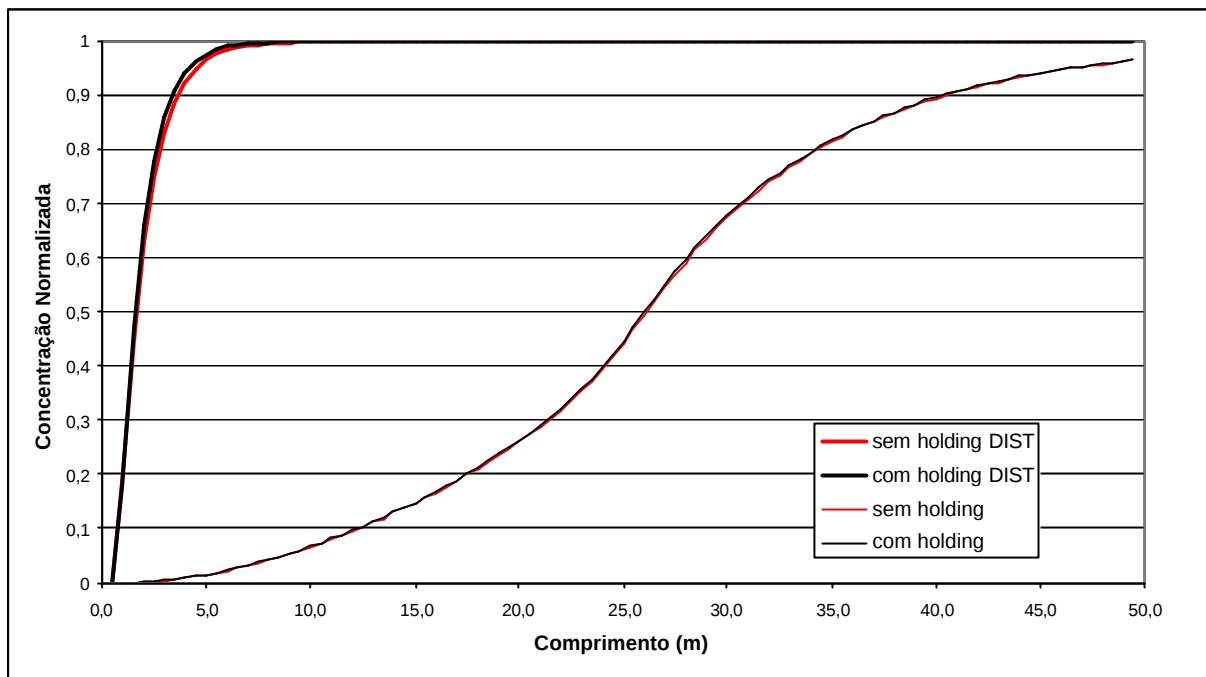


Figura 5.18: Análise da Influência da prática de “holding” no distribuidor no comprimento da mistura, curvas de distribuidor e molde.

Os resultados encontrados, apresentados na Figura 5.18, mostram que a prática de “holding” no distribuidor não apresenta uma alteração significativa na curva de mistura no distribuidor e no molde, portanto, não tem influência significativa no comprimento final da placa de mistura, sob as condições experimentais aqui analisadas.

5.2.1.5 – Influencia do gradiente de temperatura no Comprimento da Placa de Mistura

Entende-se por gradiente de temperatura, ou Grau de Superaquecimento, a diferença entre a temperatura do aço que está no distribuidor em relação ao novo aço que será misturado.

A Tabela V.25 apresenta os valores utilizados para a simulação para analisar a influencia do gradiente de temperatura no comprimento da placa de mistura.

Tabela V.25: Dados utilizados nas simulações para avaliar a influência do gradiente de temperatura no comprimento da placa de mistura

SIMULAÇÃO	1	8	9
Volume mínimo distribuidor [t]	15	15	15
Volume Trabalho Distribuidor [t]	45	45	45
Velocidade lingotamento [m/min]	1,5	1,5	1,5
Espessura [mm]	225	225	225
Largura [mm]	1200	1200	1200
Superaquecimento[°C]	0,0	5,0	20,0
Taxa reenchimento	3,0	3,0	3,0
Holding, ao volume mínimo [s]	0,0	0,0	0,0
Constante solidificação [$\text{mm}^2 \text{min}^{-1}$]	26	26	26

A Figura 5.19 apresenta os resultados das simulações.

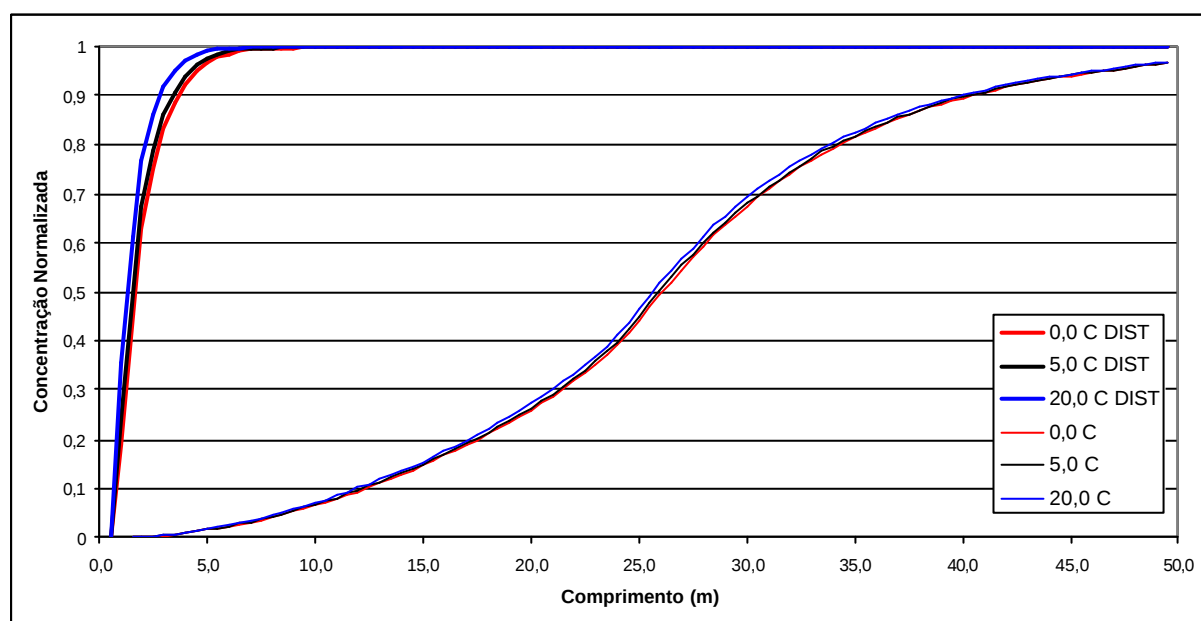


Figura 5.19: Análise da Influência do gradiente de temperatura no comprimento da mistura, curvas de distribuidor e molde.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 5.19, a diferença de temperatura entre a corrida em lingotamento e a nova corrida, apresenta uma variação pequena no comprimento da placa de mistura. Esta influência é melhor percebida na transição no distribuidor pois devido a diluição na poça líquida do molde, a transição no molde não apresenta mesma intensidade. A influência do gradiente de temperatura é melhor percebida, quando a diferença

entre as temperaturas é elevada, 20,0°C, quando a diferença entre a temperatura das corridas é pequena, a influência desta é quase imperceptível.

Estas simulações sugerem que o volume da poça de metal no molde tem papel importante quanto à definição do comprimento de mistura. Mesmo transições bruscas no distribuidor, alcançadas por práticas como troca de distribuidor, volume mínimo reduzido, holding, alta taxa de reenchimento, podem ser diluídas em razão de que o processo de mistura se completa apenas no molde. Passa a ser importante então discutir qual a fração de poça líquida que efetivamente toma parte neste processo; de fato pode ser argumentado que a inércia do jato de aço provindo do distribuidor não é suficiente para agitar todo o volume de líquido, até o ponto final teórico de solidificação. Ainda que a curvatura do veio reduza a eficácia da mistura, que a zona pastosa não toma parte.

5.3 – Análise Química das Placas de Mistura Amostradas

Para a validação do modelo matemático, foram analisadas as distribuições de concentração nas placas de mistura produzidas na planta de lingotamento contínuo número 1 da CST. A seguir serão apresentados os resultados de análise química da placa de mistura acompanhada.

Os elementos químicos analisados foram C, Mn e Si, devido a grande diferença existente entre as duas corridas em lingotamento. As Tabelas V.26 e V.27 apresentam, respectivamente, os resultados de composição química e os parâmetros de processo das corridas utilizadas para realização de mistura no mesmo distribuidor e validação do modelo desenvolvido.

Tabela V.26: Composição Química das corridas da mistura

Parâmetro	Corrida Anterior	Corrida Posterior
Valor de %C obtido	0,0382	0,0768
Valor de %C mínimo	0,030	0,065
Valor de %C máximo	0,060	0,094
Valor de %Si obtido	0,005	0,251
Valor de %Si mínimo	-	0,200
Valor de %Si máximo	0,020	0,300
Valor de %Mn obtido	0,218	0,344
Valor de %Mn mínimo	0,200	0,340
Valor de %Mn máximo	0,300	0,400

Tabela V.27: Parâmetros de Processo da Mistura

Parâmetro	Unidade	Valor
Volume de trabalho do distribuidor	Ton	40
Volume de aço na abertura da panela	Ton	32,4
Taxa de reenchimento do distribuidor	-	2,68
Velocidade de Lingotamento	m/min	1,00
Espessura da Placa	mm	225
Largura da Placa	mm	1220
Grau de superaquecimento	°C	5
Holding, ao volume mínimo.	s	0,0

Todas as análises químicas foram realizadas no laboratório de análises químicas da Aciaria da CST. Foi considerado um erro máximo de análise química, conforme informado pelo laboratório químico, de 2% em cada uma das análises realizadas.

As Tabelas V.28, V.29 e V.30, apresentam os resultados das amostras retiradas nas placas de mistura e suas concentrações normalizadas para os elementos, C, Si e Mn respectivamente. As amostras foram retiradas de 1 em 1 metro e na superfície, 7,5cm da superfície e centro da placa, conforme descrito na Metodologia, e devidamente identificadas para evitar a troca. Para levantamento das curvas de parametrização foram tomadas como ponto “zero” e “um” da curva os valores de composição química obtidos nas corridas, apresentados na Tabela V.26.

Tabela V.28: Resultados de Análise Química da Placa de Mistura – C

Amostra	C Superfície	C 7,5cm Sup.	C Centro	CN - C Superfície	CN - C 7,5cm Sup.	CN - C Centro	Posição (m)
A	0,038	0,038	0,039	-0,005	0,018	0,008	1,0
B	0,037	0,037	0,039	-0,031	0,021	0,028	2,0
C	0,035	0,045	0,041	-0,082	0,173	0,064	3,0
D	0,037	0,043	0,044	-0,031	0,129	0,157	4,0
E	0,042	0,050	0,052	0,098	0,291	0,366	5,0
F	0,049	0,053	0,056	0,278	0,389	0,464	6,0
G	0,052	0,057	0,058	0,356	0,485	0,518	7,0
H	0,055	0,059	0,062	0,433	0,536	0,608	8,0
I	0,057	0,061	0,063	0,485	0,588	0,631	9,0
J	0,059	0,059	0,064	0,536	0,536	0,660	10,0
K	0,061	0,063	0,066	0,588	0,639	0,711	11,0
L	0,062	0,065	0,067	0,613	0,678	0,745	12,0
M	0,064	0,066	0,068	0,665	0,704	0,773	13,0
N	0,069	0,065	0,070	0,794	0,701	0,809	14,0
O	0,066	0,067	0,071	0,716	0,747	0,838	15,0
P	0,068	0,068	0,072	0,768	0,773	0,869	16,0
Q	0,068	0,064	0,072	0,768	0,657	0,874	17,0
R	0,067	0,069	0,072	0,742	0,796	0,871	18,0

Tabela V.29: Resultados de Análise Química da Placa de Mistura – Si

Amostra	Si Superfície	Si 7,5cm Sup.	Si Centro	CN - Si Superfície	CN – Si 7,5cm Sup.	CN - Si Centro	Posição (m)
A	0,006	0,009	0,009	0,004	0,016	0,016	1,0
B	0,008	0,005	0,011	0,012	0,000	0,024	2,0
C	0,005	0,017	0,024	0,000	0,049	0,077	3,0
D	0,011	0,043	0,047	0,024	0,154	0,171	4,0
E	0,037	0,094	0,095	0,130	0,362	0,366	5,0
F	0,091	0,126	0,137	0,350	0,492	0,537	6,0
G	0,111	0,150	0,166	0,431	0,589	0,654	7,0
H	0,115	0,169	0,182	0,447	0,667	0,720	8,0
I	0,131	0,171	0,188	0,512	0,675	0,744	9,0
J	0,151	0,183	0,192	0,593	0,724	0,760	10,0
K	0,156	0,188	0,195	0,614	0,744	0,772	11,0
L	0,166	0,200	0,188	0,654	0,793	0,774	12,0
M	0,164	0,213	0,210	0,646	0,846	0,833	13,0
N	0,180	0,217	0,221	0,711	0,862	0,878	14,0
O	0,185	0,216	0,217	0,732	0,858	0,862	15,0
P	0,194	0,232	0,216	0,768	0,923	0,858	16,0
Q	0,207	0,235	0,236	0,821	0,935	0,939	17,0
R	0,193	0,238	0,235	0,764	0,947	0,935	18,0

Tabela V.30: Resultados de Análise Química da Placa de Mistura – Mn

Amostra	Mn Superfície	Mn 7,5cm Sup.	Mn Centro	CN - Mn Superfície	CN – Mn 7,5cm Sup.	CN-Mn Centro	Posição (m)
A	0,216	0,216	0,217	-0,016	-0,016	-0,008	1,0
B	0,215	0,216	0,214	-0,024	-0,016	-0,032	2,0
C	0,213	0,224	0,223	-0,040	0,048	0,040	3,0
D	0,220	0,228	0,239	0,016	0,079	0,167	4,0
E	0,242	0,257	0,262	0,190	0,310	0,349	5,0
F	0,261	0,273	0,274	0,341	0,437	0,444	6,0
G	0,260	0,284	0,285	0,333	0,524	0,532	7,0
H	0,290	0,294	0,293	0,571	0,603	0,595	8,0
I	0,287	0,299	0,298	0,548	0,643	0,635	9,0
J	0,291	0,302	0,302	0,579	0,667	0,667	10,0
K	0,297	0,302	0,308	0,627	0,667	0,714	11,0
L	0,305	0,313	0,309	0,690	0,754	0,722	12,0
M	0,311	0,314	0,315	0,738	0,762	0,770	13,0
N	0,317	0,318	0,331	0,786	0,794	0,897	14,0
O	0,309	0,322	0,329	0,722	0,825	0,881	15,0
P	0,319	0,324	0,330	0,802	0,841	0,889	16,0
Q	0,323	0,334	0,328	0,833	0,921	0,873	17,0
R	0,322	0,325	0,342	0,825	0,849	0,984	18,0

Para verificar se os resultados do modelo matemático desenvolvido são confiáveis ou se seria necessário algum tipo de ajuste, foram comparados os resultados previstos pelo modelo matemático com os resultados práticos de amostragem das placas. Para isso utilizou-se os parâmetros reais da geração da placa de mistura na simulação do modelo, conforme apresentado na Tabela V.27.

A Figura 5.20 apresenta os resultados comparativos da análise de carbono na placa de mistura.

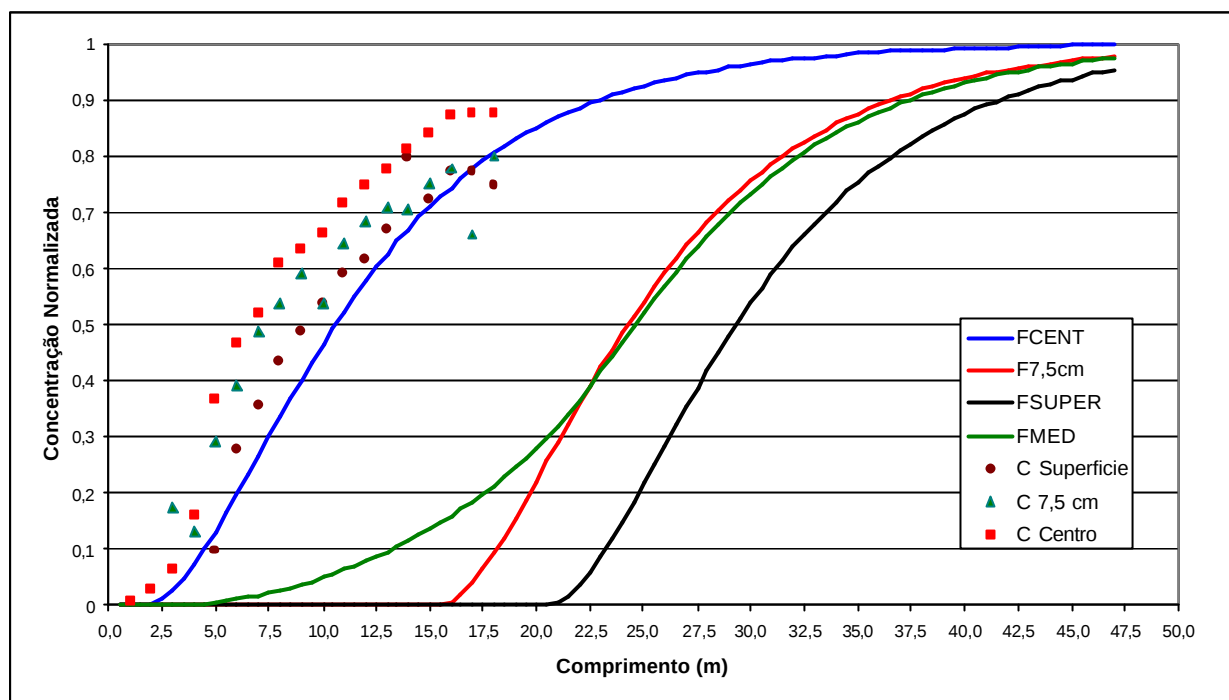


Figura 5.20 – Comparação entre os resultados do modelo matemático e resultados experimentais - carbono

Os resultados apresentados na Figura 5.20 mostram que existe uma defasagem entre as curvas geradas pelo modelo e os resultados encontrados na amostragem da placa de mistura. As curvas reais de transição são praticamente idênticas e se distanciam pouco uma das outras. Como esperado a transição é observada primeiro no centro da placa e finalmente na sua superfície. Por outro lado a curva prevista para o centro, FCENT, se aproxima daquelas observadas via análise química; entretanto a defasagem entre as curvas previstas, compare-se FCENT e FSUP por exemplo, é significativa e contrária ao observado. Isto pode ser devido a que o modelo proposto considera que a mistura ocorre em toda a poça líquida, o que pode não corresponder à realidade. De acordo com o mesmo é no centro da placa que se inicia a transição da troca de qualidades, pelo fato da porção exterior (pele) já se encontrar solidificada. Logo as condições de agitação e mistura na parte central (e profunda) do veio são determinantes.

A Figura 5.21 apresenta os resultados comparativos da análise de manganês na placa de mistura.

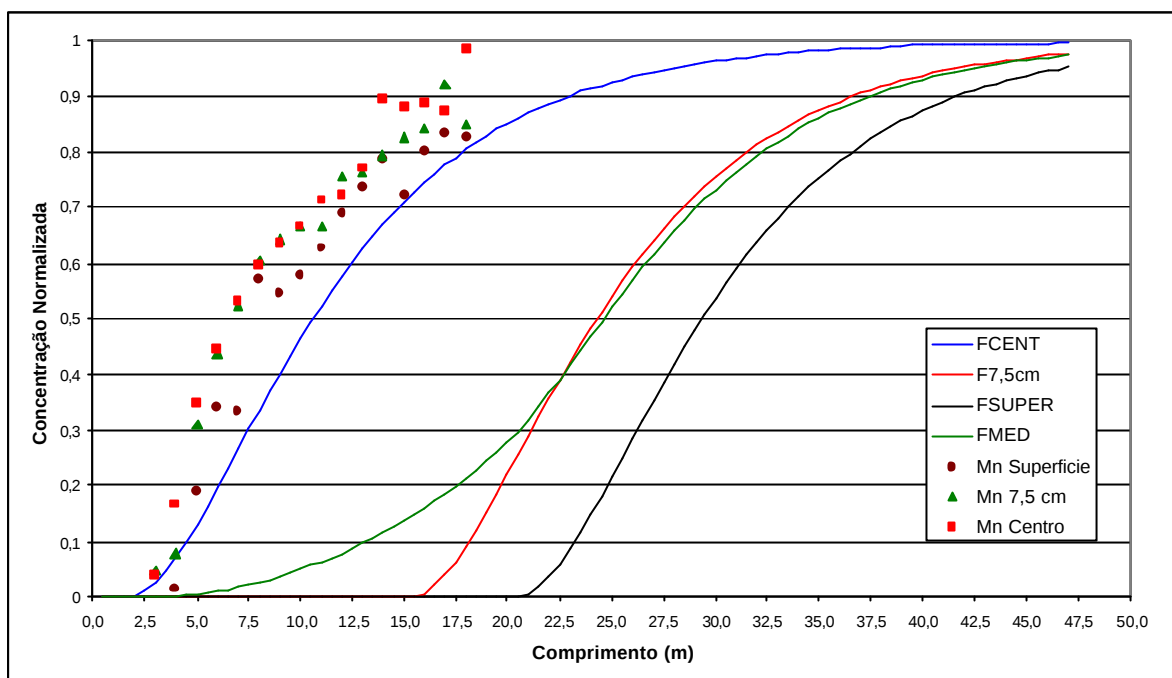


Figura 5.21 – Comparação entre os resultados do modelo matemático e resultados experimentais - Manganês

A Figura 5.22 apresenta os resultados comparativos da análise de silício na placa de mistura.

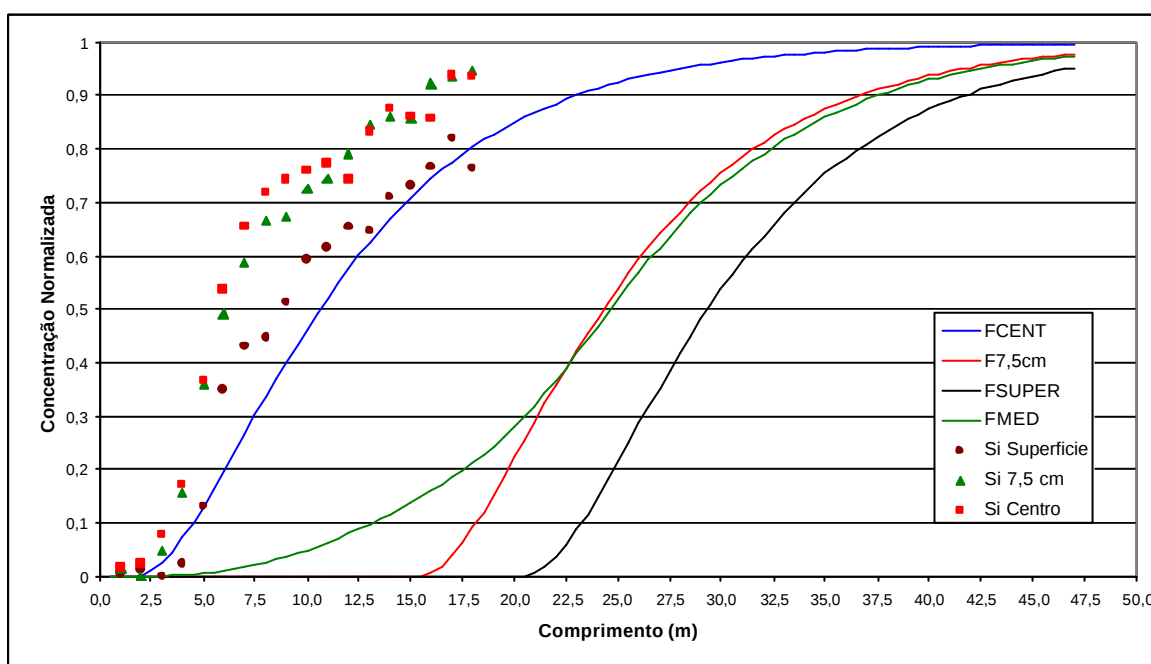


Figura 5.22 – Comparação entre os resultados do modelo matemático e resultados experimentais – Silício

Observando-se os resultados relativos à transição dos três elementos, nota-se que o mesmo comportamento apresentado pela análise de carbono se repete para os outros elementos.

A título de comparação a Figura 5.23 apresenta resultados superpostos de transição, para os três elementos químicos.

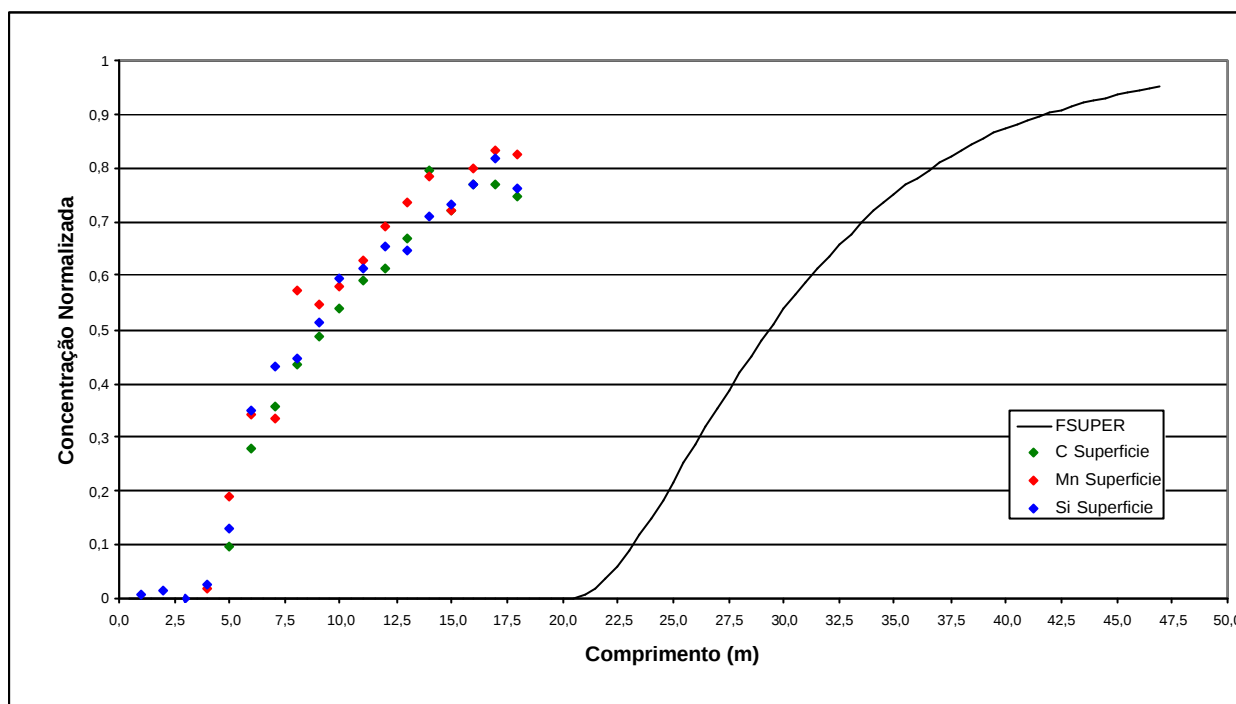


Figura 5.23 – Comparação entre os resultados das análises dos três elementos da placa de mistura com o modelo - Superfície.

Apesar de haver a defasagem(entre amostragem e previsão) identificada na análise das Figuras 5.20, 5.21 e 5.22, nota-se na Figura 5.23 que o comportamento normalizado dos três elementos é semelhante; isto confirma, conforme citado por Mostert e colaboradores(1998) que a contribuição da difusão turbulenta é mais importante que a difusão molecular, por isso, todas as espécies químicas demonstram comportamento similar.

Como citado, a explicação para a defasagem encontrada entre o modelo de mistura proposto e as análises químicas realizadas nas placas de mistura, pode dever-se ao fato do modelo proposto considerar como volume de mistura no molde toda a poça líquida, calculada de acordo com o valor da constante de solidificação k da máquina. Para aproximação das curvas propostas pelo modelo às curvas obtidas a partir das análises químicas pode ser considerado um parâmetro adicional, a ser denominado Constante Efetiva de Solidificação. Este parâmetro consiste apenas da adequação (aumento) do valor da constante de solidificação da máquina empregada no modelo, de modo que apenas uma fração definida do volume de líquido no molde tome parte do processo de mistura. Este artificialismo matemático, que tem bases físicas, na prática reduz a profundidade na poça que seria alcançada pelo aço da segunda

panela e, por consequência reduz o poder de diluição da poça. Para clarificação deste raciocínio, na Figura 5.24, são apresentadas a influência das variações do valor de k nas curvas do modelo.

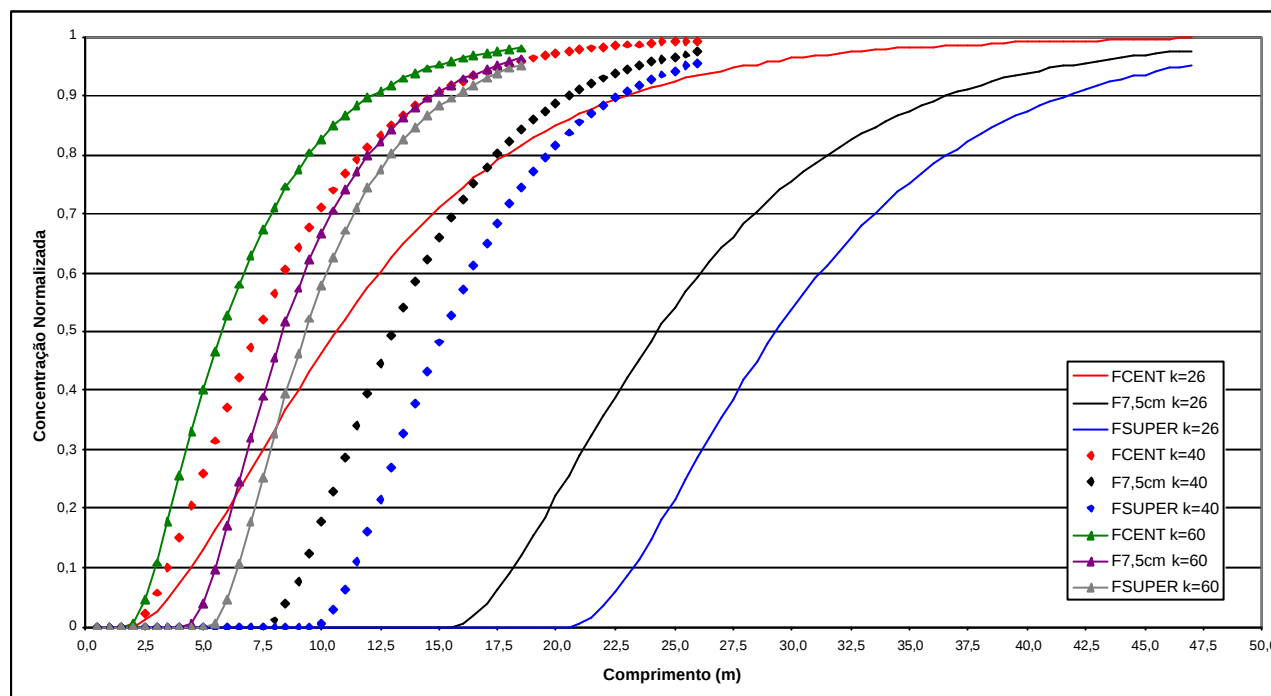


Figura 5.24 – Comparação entre os resultados do modelo de acordo com a variação dos valores da constante de solidificação k .

Conforme pode ser visto na Figura 5.24 à medida que o valor da Constante Efetiva de Solidificação aumenta, as curvas de mistura no centro, 7,5cm da superfície e superfície previstas pelo modelo se aproximam uma das outras. Também, devido à redução do volume efetivo de mistura da poça líquida, as curvas se aproximam mais da região do menisco, isto é são transladas para a esquerda.

Portanto, para o ajuste do modelo e sua utilização, se faz necessário definir um valor de Constante Efetiva de Solidificação, ou um valor de Fração de Poça Líquida no molde que toma parte do processo de mistura.

De forma geral, analisando os resultados comparativos para a placa de mistura, pode-se dizer que o modelo matemático elaborado neste trabalho representa bem a mistura que ocorre no distribuidor e no veio durante lingotamento contínuo de diferentes qualidades de aço.

6. CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi realizado um estudo sobre a mistura de aços, ou troca de qualidades, no distribuidor e veio durante a operação de lingotamento contínuo da CST. Este estudo envolveu o desenvolvimento de um modelo matemático para prever o comprimento da placa de mistura e a realização de amostragens em placas de mistura obtidas na planta industrial da CST, para verificação das simulações realizadas pelo modelo matemático. Os resultados encontrados permitiram que fossem tiradas as seguintes conclusões:

- a metodologia adotada para avaliar a mistura de qualidades no distribuidor através do modelo matemático desenvolvido é adequada;
- o peso de aço no distribuidor no momento de iniciar a troca de qualidade tem importância significativa para minimizar o comprimento da placa de mistura gerada. Esse volume de aço deve ser o menor possível, sem, contudo correr risco de formação de vórtex e, consequentemente, de passagem de escória do distribuidor para o molde. Esse risco é o que limita o volume mínimo de aço no distribuidor para realização da troca de qualidades no lingotamento contínuo. Esse fato trará como consequência uma diminuição nas perdas ao final de uma sequência de lingotamento;
- a taxa de extração da placa em lingotamento apresenta uma influência expressiva no comprimento da placa de mistura gerada. Na medida em que se diminuiu a taxa de extração de aço do distribuidor, diminuiu-se o comprimento da placa de mistura. Porém, na planta industrial, a velocidade de lingotamento é ditada pelas condições de processo.
- a prática de holding durante a troca de qualidades e a taxa de reenchimento do distribuidor não apresentaram influência significativa no comprimento da placa de mistura.
- a influência do gradiente de temperatura entre as corridas da mistura, no comprimento da placa de mistura, somente é melhor perceptível para valores elevados.

- o comportamento similar apresentados pelos análise dos elementos químicos, confirma que a contribuição da difusão turbulenta é mais importante que a difusão molecular, portanto é possível descrever o processo de mistura a partir da concentração normalizada.

Todas as conclusões anteriores foram obtidas assumindo que todo o líquido no molde toma parte no processo de mistura. A dispersão do jato de aço, a curvatura do veio, o crescimento dendrítico, podem ser impeditivos desta participação. Como a poça líquida age como diluidor, portanto efetivamente atrasando a transição os efeitos acima podem ter sido minimizados.

O modelo reproduz com maior fidedignidade os resultados experimentais após a introdução do conceito de Constante Efetiva de Solidificação, Fração de Poça Líquida que participa do processo de mistura.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visando dar continuidade ao aprimoramento dos métodos de avaliação do escoamento do aço líquido no processo de lingotamento contínuo, utilizando-se das técnicas de modelamento matemático, sugere-se o desenvolvimento dos seguintes trabalhos futuros:

- avaliar a influência do projeto YES de distribuidor (projeto em teste na máquina de lingotamento contínuo nº2 da CST) no comprimento da mistura, através de modelamento matemático e físico;
- desenvolver modelamento matemático de mistura de aços para o distribuidor da máquina de lingotamento contínuo nº2 da CST;
- estudar a aplicação do modelo matemático desenvolvido na operação on-line das máquinas de lingotamento contínuo da CST;

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, S.O.C., RIBEIRO, H.L.O., SANTOS, A.A., "Efeito da Flutuação de Barragens no Distribuidor sobre a Flutuação de Inclusões" Seminário sobre Aciaria, Refratário, Fornos Elétricos, Ferro-ligas e Fundição da ABM, p 11-20, Porto Alegre – RS, Setembro de 1993.

BIANCHI, M. V. A., NIECKELE, A.O., DREUX, M.A., "Simulação Numérica Tridimensional do Escoamento em um Distribuidor de Aço para Lingotamento Contínuo" 47º Congresso da ABM, p 117-136, Vol 4, Belo Horizonte – MG, Agosto de 1992.

CASTRO, L.F.A., TAVARES, R.P., "Modelagem Matemática do Escoamento de Fluido e Transferência de Calor em um Distribuidor de Lingotamento Contínuo". 54º Congresso Anual da ABM, p 544-553, São Paulo – SP, 25 a 26 de junho de 1999.

COSTA, A.M., BARBOSA, F.A., TAVARES, R.P., FILHO, G.M.A., "Modelamento Matemático e Físico do escoamento do Aço Líquido em Diferentes Projetos de Distribuidor do Lingotamento Contínuo da Usiminas". XXXIV Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais, p 427-436, Belo Horizonte – MG, 19 a 21 de maio de 2003.

COSTA, A.M., BARBOSA, F.A., TAVARES, R.P., "Modelamento Matemático da Transição de Graus de Aço Lingotamento Contínuo da Usiminas". XXXV Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais, p 212-220, Salvador – BA, 17 a 19 de maio de 2004.

FURTADO, H. S., MELLO, A. H. B., PIRES, L. F. G., NIECKELE, A.O., "Análise do Desempenho de Distribuidores de Aço para Lingotamento Contínuo de Barragem Dupla e Quadrúpla". 49º Congresso Internacional de Tecnologia de Metalurgia e Materiais, p 351-363, Belo Horizonte – MG, 1994

GOLDSCHMIT, M. B., FERRO, S. P., "Model for Optimization of the Grade Transition in the Round Continuous Casting" European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, p.1-16, Barcelona, 11-14 September 2000.

MOSTERT, R., GENDT, G. G. M. , BOGERT, R. J. "The Intermix Models of the Slab and Billet Caster of Hoogovens Steel in The Netherlands" Steelmaking Conference, p.44-52, 1998

PICCONE, T. J., SINHA, A. K., MADDENS, M. A., "Intermix Trials at Gary n°2 Caster Using Different Tundish Configuration" 84th Steelmaking Conference; Baltimore, Maryland; p.101-110, March 25-28, 2001.

RASMUSSEN, P., "Mixed Grade Casting With Turbostop Impact Pads At Dofasco". Steelmaking Conference Proceedings, v.79, p.533-538, March 24-27, 1996.

REIS, M.V.F., et ali "Simulação Numérica do Escoamento Bifásico Turbulento em Regime Permanente na Válvula Submersa e no Molde em Aplicações de Lingotamento Contínuo."13º IAS Steelmaking Seminar, Argentina, p. 217-226, Novembro 2001.

SILVA, C. A., et ali "Caracterização do Escoamento do Aço Líquido no Distribuidor da Máquina de Lingotamento Contínuo Operando em Regime Transiente – Modelagem Física". 56º Congresso Anual da ABM, p.1304-1312, 16-20 julho 2001.

SILVA, C. A., et ali "Estudos de Otimização do Distribuidor de Lingotamento Contínuo da Acesita, via Modelagem Física". XXXIV Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais; p.302-311, Belo Horizonte – MG. 19 a 21 de maio de 2003.

SINHA, A. K., VASSILICOS, A., "Physical Modeling Study of Effect of a Turbulence Suppressor Device on Flow and Mixing the Dual Strand Tundish" 84th Steelmaking; Baltimore, Maryland; p.111-125, March 25-28, 2001.

SYLVESTRE, S., DI GRESIA, G., CHIAPPAROLI, W., MADIAS, J., "Study of Steel Grade Change in the Siderar Tundish", 13th IAS Steelmaking Seminar, Buenos Aires, Argentina, p.679-704, October 2001.

SYLVESTRE, S., DI GRESIA, G., CHIAPPAROLI, W., MADIAS, J., "Estudio sobre Cambio de Grado en el Repartidor de Siderar", XXXIV Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais; p.336-374, Belo Horizonte – MG. 19 a 21 de maio de 2003.

SZEKERES, E.S., “Strand Solification: Part I – Shell Development”, Brimacombe Continuous Casting Course, v.2N, p.1-4, 16-20 May, 2005

THOMAS, B. G., HUANG, X., “Intermixing Model Of Continuous Casting During A Grade Transition”. Metallurgical Transactions B, v.27B, p.617-632, August, 1996.

THOMAS, B.G. “Modeling Study of Intermix in Tundish and Strand During a Continuous Casting Grade Transition”. Metallurgical Transactions B, p.83-96, November, 1997.

THOMAS, B.G., VANKA S.P., “Study of Transient Flow Structures in Continuous Casting of Steel”. NSF Design & Manufacturing Grantees Conference, Long Beach, CA, January 5-8, 1999.

TSUKIHASHI, F., LI, B., “Effect of Static Magnetic Field Application on The Mass Transfer in Sequence Slab Continuous Casting Process” ISIJ International, v.41, p.844-850, May 10, 2001

VALADARES, C.A.G , BEZERRA, M.C.C, “Lingotamento Continuo de Placas” Curso ABM, p.11-16, 2005

YEH, J. L., HWANG, W. S., CHOU, C. L., “The Development of a Mathematical Model to Predict Composition Distribution in Casting Slab and Intermix Slab Length During Ladle Changeover Period and Its Verification by Physical Model”. ISIJ International, V.33, p.588-594, February 25, 1993.

YU, Q., DICKINSON, D., SKAGEN, R., “Determination of Transition Slab Weight for Grade Change During Continuous Casting” AISTech 2005, Proceedings, Volume II, p 169-180, 2005.

ZIMMERMAN, T. A., SCHMIDT, M., “A Dynamic Mathematical Model For Grade-Mixing In Tundish And Strand”. ISSTech Conference, p.1173- 1192, April, 2003.

ANEXOS

ANEXO A: Dados de simulação no modelo do distribuidor, regime transiente frio

Tabela 1: Resultados da sequência de testes transientes com vazão de 8 ton/min, nível mínimo de 15 ton e taxa de reenchimento de 1,5

8015120		Condição				int. de descarte (s)		vol.de descarte(ton)		tempo mín. 0.020 (s)	
	testes	vazão(ton/min)	reench(ton/min)	reech/vazão	nível(ton)	veio1	veio2	veio1	veio2	veio1	veio2
1	rs1017n1	8.51	12.59	1.479436	15	88.66	66.13	5.76	4.18	42.33	39.39
2	rs1017n2	8.38	12.66	1.51074	15	72.21	70.49	4.84	4.38	40.53	34.53
3	rs1017n3	8.64	12.63	1.461806	15	75.53	68.21	5.01	4.27	39.87	38.54
4	rs1017n4	8.77	12.53	1.428734	15	62.4	68.02	4.15	4.28	42.63	35.59
5	rs1017n5	8.59	12.55	1.461001	15	66.12	66.12	4.42	4.14	39.96	37.21
6	rs1017n6	8.71	12.66	1.453502	15	66.02	62.41	4.4	3.9	40.72	34.64
média		8.6	12.60333	1.46587	15	71.82333	66.89667	4.763333	4.191667	41.00667	36.585
desvio padrão		0.140855	0.055737	0.027458	0	9.511763	2.728367	0.580712	0.165701	1.190238	1.951458

Tabela 2: Resultados da sequência de testes transientes com vazão de 8 ton/min, nível mínimo de 22 ton e taxa de reenchimento de 1,5

8022120		condição				int. de descarte (s)		vol.de descarte(ton)		tempo mín. 0.020 (s)	
	testes	vazão(ton/min)	reench(ton/min)	reech/vazão	nível(ton)	veio1	veio2	veio1	veio2	veio1	veio2
1	rs1001n1	8.68	12.41	1.429724	22	101.22	105.8	7.04	7.02	59.95	54.04
2	rs1001n2	8.52	12.46	1.462441	22	120.53	95.33	8.25	6.25	49.09	51.94
3	rs1001n3	8.6	12.5	1.453488	22	110.16	99.78	7.53	6.61	41.18	48.51
4	rs1001n4	8.44	12.42	1.471564	22	102.83	105.78	7.04	7.08	54.89	53.57
5	rs1001n5	8.49	12.46	1.467609	22	107.79	85.25	7.36	5.7	42.23	45.08
6	rs1001n6	8.36	12.48	1.492823	22	105.69	77.43	7.16	5.18	44.15	42.71
média		8.515	12.455	1.462942	22	108.0367	94.895	7.396667	6.306667	48.58167	49.30833
desvio padrão		0.113798	0.034496	0.020891	0	6.924391	11.48483	0.459942	0.753596	7.53738	4.680391

Tabela 3: Resultados da sequência de testes transientes com vazão de 8 ton/min, nível mínimo de 15 ton e taxa de reenchimento de 2,0

8015160		condição				int. de descarte (s)		vol.de descarte(ton)		tempo mín. 0.020 (s)	
	testes	Vazão (ton/min)	Reench (ton/min)	reech/ vazão	nível(ton)	veio1	veio2	veio1	veio2	veio1	veio2
1	rs1022n1	8.47	16.03	1.892562	15	80.22	63.08	5.46	4.1	43.09	36.53
2	rs1022n2	8.45	16.24	1.921893	15	69.92	60.31	4.76	3.94	44.53	33.86
3	rs1022n3	8.53	16.31	1.912075	15	72.21	59.74	5.02	3.91	40.34	37.77
4	rs1022n4	8.59	16.19	1.88475	15	72.29	63.82	4.94	4.18	42.52	33.01
5	rs1022n5	8.41	16.2	1.926278	15	69.63	55.55	4.84	3.61	38.14	34.24
6	rs1022n6	8.52	16.15	1.89554	15	77.92	58.42	5.29	3.77	40.53	35.2
média		8.495	16.18667	1.905516	15	73.69833	60.15333	5.051667	3.918333	41.525	35.10167
desvio padrão		0.06442	0.09395	0.016976	0	4.367615	3.04632	0.270881	0.209324	2.294417	1.779274

Tabela 4: Resultados da sequência de testes transientes com vazão de 8 ton/min, nível mínimo de 22 ton e taxa de reenchimento de 2,0

8022160		condição				int. de descarte (s)		vol.de descarte(ton)		tempo mín. 0.020 (s)	
	testes	Vazão (ton/min)	Reench (ton/min)	reech/ vazão	nível(ton)	veio1	veio2	veio1	veio2	veio1	veio2
1	rs1019n1	8.57	14.53	1.695449	22	115.3	87.43	8.09	5.93	63.64	59.46
2	rs1019n2	8.67	16.12	1.859285	22	99.61	98.07	7.08	6.87	39.57	40.99
3	rs1019n3	8.69	15.92	1.831991	22	88.77	85.72	6.3	5.93	38.33	42.52
4	rs1019n4	8.7	15.88	1.825287	22	82.97	91.62	5.9	6.31	43.75	39.57
5	rs1019n5	8.59	16.03	1.866123	22	93.03	78.67	6.54	5.44	53.66	42.6
6	rs1019n6	8.54	16.03	1.877049	22	78.78	86.17	5.77	5.94	43.86	43.86
média		8.626667	15.75167	1.825864	22	93.07667	87.94667	6.613333	6.07	47.135	44.83333
desvio padrão		0.068313	0.604629	0.066938	0	13.12745	6.487115	0.862778	0.479708	9.715264	7.317102

Tabela 5: Resultados da sequência de testes transientes com vazão de 10 ton/min, nível mínimo de 15 ton e taxa de reenchimento de 1,5

10015150		condição				int. de descarte (s)		vol.de descarte(ton)		tempo mín. 0.020 (s)	
	testes	vazão(ton/min)	reench(ton/min)	reench/vazão	nível(ton)	veio1	veio2	veio1	veio2	veio1	veio2
1	rs1029n7	10.84	15.24	1.405904	15	42.44	46.41	3.52	3.52	32.62	32.62
2	rs1029n2	10.32	15.68	1.51938	15	44.42	40.43	3.67	3.31	37.86	28.07
3	rs1029n3	10.39	15.61	1.502406	15	56.49	38.34	4.72	2.96	41.66	37.76
4	rs1029n4	10.62	15.55	1.464218	15	56.6	50.52	4.89	4.01	37.67	33.77
5	rs1029n5	10.54	15.42	1.462998	15	40.99	45.1	3.47	3.68	36.06	26.17
6	rs1029n6	10.51	15.59	1.483349	15	46.14	33.12	3.92	2.68	37.21	33.11
média		10.53667	15.515	1.473043	15	47.84667	42.32	4.031667	3.36	37.18	31.91667
desvio padrão		0.183376	0.159844	0.039502	0	6.960298	6.25698	0.621463	0.48485	2.926493	4.178974

Tabela 6: Resultados da sequência de testes transientes com vazão de 10 ton/min, nível mínimo de 22 ton e taxa de reenchimento de 1,5

10022150		condição				int. de descarte (s)		vol.de descarte(ton)		tempo mín. 0.020 (s)	
	testes	vazão(ton/min)	reench(ton/min)	reench/vazão	nível(ton)	veio1	veio2	veio1	veio2	veio1	veio2
1	rs1023n1	10.46	14.38	1.374761	22	91.33	76.87	7.69	6.77	40.25	36.72
2	rs1023n2	10.45	15.43	1.476555	22	77.82	77.82	6.82	6.62	40.72	40.72
3	rs1023n3	10.58	15.35	1.450851	22	69.82	71.56	5.97	6.2	43.67	43.67
4	rs1023n4	10.48	15.44	1.473282	22	75.91	70.69	6.59	6.21	39.68	39.68
5	rs1023n5	10.44	15.37	1.472222	22	86.86	74.78	7.54	6.31	43.75	39.76
6	rs1023n6	10.43	15.42	1.478428	22	80.19	77.62	6.93	6.6	35.3	35.3
média		10.47333	15.23167	1.45435	22	80.32167	74.89	6.923333	6.451667	40.56167	39.30833
desvio padrão		0.055015	0.418732	0.040243	0	7.745407	3.120872	0.632255	0.242274	3.111652	2.9707

Tabela 7: Resultados da sequência de testes transientes com vazão de 10 ton/min, nível mínimo de 15 ton e taxa de reenchimento de 2,0

10015200		condição				int. de descarte (s)		vol.de descarte(ton)		tempo mín. 0.020 (s)	
	testes	vazão(ton/min)	reench(ton/min)	reench/vazão	nível(ton)	veio1	veio2	veio1	veio2	veio1	veio2
1	rs1115n1	10.9	18.69	1.714679	15	56.6	48.41	4.89	3.88	25.88	27.87
2	rs1115n2	10.56	19.27	1.824811	15	58.13	54.05	5.03	4.58	23.32	25.3
3	rs1115n3	10.85	18.37	1.693088	15	52.41	48.43	4.52	3.95	29.78	27.79
4	rs1115n4	10.88	18.05	1.659007	15	50.42	52.52	4.43	4.4	32.82	21.41
5	rs1115n5	10.75	18.86	1.754419	15	56.62	51.28	5	4.29	27.4	29.78
6	rs1115n6	10.84	17.7	1.632841	15	44.34	46.61	3.81	3.83	34.05	32.06
média		10.79667	18.49	1.713141	15	53.08667	50.21667	4.613333	4.155	28.875	27.36833
desvio padrão		0.126912	0.568753	0.06922	0	5.183364	2.849377	0.466333	0.310532	4.127138	3.688823

Tabela 8: Resultados da sequência de testes transientes com vazão de 10 ton/min, nível mínimo de 22 ton e taxa de reenchimento de 2,0

10022200		condição				int. de descarte (s)		vol.de descarte(ton)		tempo mín. 0.020 (s)	
	testes	vazão(ton/min)	reench(ton/min)	reench/vazão	nível(ton)	veio1	veio2	veio1	veio2	veio1	veio2
1	rs1108n1	10.52	18.08	1.718631	22	73.46	69.07	6.47	5.91	32.16	34.15
2	rs1108n2	10.67	18.87	1.76851	22	66.7	72.7	5.89	6.3	36.63	26.45
3	rs1108n3	10.74	18.06	1.681564	22	68.69	72.68	6.1	6.47	32.4	27.78
4	rs1108n4	10.72	17.7	1.651119	22	70.41	84.47	6.29	7.27	33.88	33.88
5	rs1108n5	10.65	18.71	1.756808	22	79.15	72.67	7.11	6.29	30.81	37
6	rs1108n6	10.68	17.53	1.641386	22	72.4	65.36	6.4	5.62	28.46	30.72
média		10.66333	18.15833	1.703003	22	71.80167	72.825	6.376667	6.31	32.39	31.66333
desvio padrão		0.077632	0.535067	0.053626	0	4.353212	6.410818	0.416637	0.562814	2.763766	4.067582

Tabela 9: Resultados médios dos testes transientes

média		condição				int. de descarte (s)		vol.de descarte(ton)		tempo mín. 0.020 (s)	
	testes	vazão(ton/min)	reench(ton/min)	reench/vazão	nível(ton)	veio1	veio2	veio1	veio2	veio1	veio2
1	8015120	8.6	12.60333	1.46587	15	71.82333	66.89667	4.763333	4.191667	41.00667	36.585
2	8022120	8.515	12.455	1.462942	22	108.0367	94.895	7.396667	6.306667	48.58167	49.30833
3	8015160	8.495	16.18667	1.905516	15	73.69833	60.15333	5.051667	3.918333	41.525	35.10167
4	8022160	8.626667	15.75167	1.825864	22	93.07667	87.94667	6.613333	6.07	47.135	44.83333
5	10015150	10.53667	15.515	1.473043	15	47.84667	42.32	4.031667	3.36	37.18	31.91667
6	10022150	10.47333	15.23167	1.45435	22	80.32167	74.89	6.923333	6.451667	40.56167	39.30833
7	10015200	10.79667	18.49	1.713141	15	53.08667	50.21667	4.613333	4.155	28.875	27.36833
8	10022200	10.66333	18.15833	1.703003	22	71.80167	72.825	6.376667	6.31	32.39	31.66333
média		9.588333	15.54896	1.625466	18.5	74.96146	68.76792	5.72125	5.095417	39.65688	37.01063
desvio padrão		1.105007	2.212221	0.183881	3.741657	19.58866	17.83152	1.249316	1.299995	6.728362	7.260941

Anexo B Dados de simulação no modelo do distribuidor, regime transiente frio, com holding

Tabela 10: Resultados da sequência de testes transientes com tempo de holding (50 Seg) vazão de 8 ton/min, nível mínimo de 15 ton e taxa de reenchimento de 1,5

8015120(30s)		Condição				int. de descarte (s)		Vol.de descarte(ton)		tempo mín. 0.020 (s)		holding
	testes	vazão(ton/min)	reench(ton/min)	reench/vazão	nível(ton)	veio1	veio2	veio1	veio2	veio1	veio2	(tempo)
1	RS0212h1	8.62	13.06	1.515081	15	63.44	54.04	4.18	3.19	41.67	37.1	55.46
2	RS0212h2	8.63	13.1	1.517961	15	70.11	67.85	4.52	4.23	47.18	37.75	58.78
3	RS0212h3	8.77	13.12	1.496009	15	69.27	47.94	4.52	2.98	44.13	32.72	57.75
4	RS0212h4	8.85	12.04	1.360452	15	58.31	53.37	3.79	3.33	46.12	33.59	56.22
5	RS0212h5	8.81	13.07	1.483541	15	71.06	54.23	4.54	3.35	46.99	33.01	53.83
6	RS0212h6	8.61	13.13	1.524971	15	56.9	50.04	3.67	3.13	41.68	34.35	55.48
média		8.715	12.92	1.483003	15	64.84833	54.57833	4.203333	3.368333	44.62833	34.75333	56.25333
desvio padrão		0.107285	0.431972	0.061969	0	6.224633	6.966668	0.39236	0.44355	2.53007	2.152976	1.773422

Tabela 11: Resultados da sequência de testes transientes com tempo de holding (50 Seg) vazão de 8 ton/min, nível mínimo de 22 ton e taxa de reenchimento de 1,5

8022120(30s)		Condição				int. de descarte (s)		vol.de descarte(ton)		tempo mín. 0.020 (s)		holding
	testes	vazão(ton/min)	reench(ton/min)	reench/vazão	nível(ton)	veio1	veio2	veio1	veio2	veio1	veio2	(tempo)
1	RS1210h1	8.6	13	1.511628	22	98.47	86.1	6.7	5.63	56.22	44.23	52.23
2	RS1210h2	8.56	12.97	1.515187	22	83.9	88.48	5.65	5.83	42.9	45.19	56.03
3	RS1210h3	8.83	13.01	1.473386	22	94.66	85.24	6.42	5.64	42.33	44.61	54.02
4	RS1210h4	8.81	13.1	1.486947	22	75.15	77.53	5.08	5.13	58.21	55.93	55.93
5	RS1210h5	8.69	13	1.495972	22	102.94	83.63	6.98	5.56	37.48	40.15	54.42
6	RS1210h6	8.75	12.98	1.483429	22	86	83.35	5.86	5.6	53.46	48.9	53.46
média		8.706667	13.01	1.494425	22	90.18667	84.055	6.115	5.565	48.43333	46.50167	54.34833
desvio padrão		0.110393	0.046476	0.016425	0	10.33851	3.699193	0.712173	0.232616	8.594495	5.393487	1.464178

Tabela 12: Resultados da sequência de testes transientes com tempo de holding (50 Seg) vazão de 8 ton/min, nível mínimo de 15 ton e taxa de reenchimento de 2,0

8015160(30s)		Condição				int. de descarte (s)		vol.de descarte(ton)		tempo mín. 0.020 (s)		holding
	testes	vazão(ton/min)	reench(ton/min)	reench/vazão	nível(ton)	veio1	veio2	veio1	veio2	veio1	veio2	(tempo)
1	RS0213h1	9.11	16.96	1.86169	15	52.32	52.05	3.59	3.14	35.76	35.76	56.6
2	RS0213h2	8.65	16.89	1.952601	15	60.6	49.85	4.09	3.13	39.09	39.09	52.14
3	RS0213h3	8.85	16.97	1.917514	15	50.05	38.63	3.38	2.41	45.57	38.05	53.08
4	RS0213h4	8.55	16.93	1.980117	15	60.69	58.42	4.09	3.65	41.37	41.37	58.68
5	RS0213h5	8.83	17	1.925255	15	66.41	46.41	4.45	2.95	41.19	36.64	55.08
6	RS0213h6	8.66	17.17	1.982679	15	59.16	58.51	4.02	3.68	43.09	40.91	55.18
média		8.775	16.98667	1.936643	15	58.205	50.645	3.936667	3.16	41.01167	38.63667	55.12667
desvio padrão		0.200175	0.097297	0.045558	0	6.021338	7.579055	0.386661	0.472948	3.362466	2.256135	2.362665

Tabela 13: Resultados da sequência de testes transientes com tempo de holding (50 Seg) vazão de 8 ton/min, nível mínimo de 22 ton e taxa de reenchimento de 2,0

8022160(30s)		Condição				int. de descarte (s)		vol.de descarte(ton)		tempo mín. 0.020 (s)		holding
	testes	vazão(ton/min)	reench(ton/min)	reench/vazão	nível(ton)	veio1	veio2	veio1	veio2	veio1	veio2	(tempo)
1	RS0131h1	8.65	16.28	1.882081	22	75.73	73.44	5.13	4.86	51.1	64.99	53.38
2	RS0131h2	8.73	16.9	1.935853	22	93.9	74.31	6.45	4.95	46.61	48.61	60.69
3	RS0131h3	9.02	16.92	1.875831	22	89.61	76.41	6.14	5	53.85	44.05	56.14
4	RS0131h4	8.62	16.78	1.946636	22	73.63	84.3	5.03	5.51	47.67	39.77	55.57
5	RS0131h5	8.69	16.94	1.949367	22	84.38	79.07	5.78	5.44	46.61	46.61	54.32
6	RS0131h6	8.94	16.93	1.893736	22	97.22	93.9	6.58	6.25	41.95	41.95	54.51
média		8.775	16.79167	1.913917	22	85.745	80.23833	5.851667	5.335	47.965	47.66333	55.76833
desvio padrão		0.165015	0.257404	0.033704	0	9.613059	7.752701	0.659194	0.522484	4.108546	9.057838	2.599442

Tabela 14: Resultados da seqüência de testes transientes com tempo de holding (50 Seg) vazão de 10 ton/min, nível mínimo de 15 ton e taxa de reenchimento de 1,5

10015150(30s)		Condição				int. de descarte (s)		vol.de descarte(ton)		tempo mín. 0.020 (s)		holding
	testes	vazão(ton/min)	reench(ton/min)	reench/vazão	nível(ton)	veio1	veio2	veio1	veio2	veio1	veio2	(tempo)
1	RS0304h1	10.85	16.28	1.500461	15	44.23	41.95	3.65	3.3	32.25	29.97	57.37
2	RS0304h2	10.52	16.26	1.545627	15	54.32	46.82	4.58	3.7	28.27	30.93	51.37
3	RS0304h3	10.86	16.39	1.509208	15	44.51	54.99	3.74	4.25	28.63	31.2	57.26
4	RS0304h4	10.61	16.27	1.533459	15	44.13	46.22	3.72	3.65	29.2	31.3	50.89
5	RS0304h5	10.9	16.27	1.492661	15	53.66	56.05	4.37	4.28	34.54	32.25	54.99
6	RS0304h6	10.45	16.21	1.551196	15	47.29	42.62	3.91	3.31	33.31	26.26	52.33
média		10.69833	16.28	1.522102	15	48.02333	48.10833	3.995	3.748333	31.03333	30.31833	54.035
desvio padrão		0.195491	0.05933	0.024618	0	4.771766	6.061351	0.387234	0.43347	2.673325	2.11839	2.909816

Tabela 15: Resultados da seqüência de testes transientes com tempo de holding (50 Seg) vazão de 10 ton/min, nível mínimo de 22 ton e taxa de reenchimento de 1,5

10022150(30s)		Condição				int. de descarte (s)		vol.de descarte(ton)		tempo mín. 0.020 (s)		holding
	testes	vazão(ton/min)	reench(ton/min)	reench/vazão	nível(ton)	veio1	veio2	veio1	veio2	veio1	veio2	(tempo)
1	RS0303h1	10.88	16.25	1.493566	22	79.52	68.97	6.85	5.84	39.3	41.86	52.33
2	RS0303h2	10.41	16.3	1.565802	22	69.65	77.82	5.93	6.52	37.78	35.11	51.18
3	RS0303h3	10.59	16.2	1.529745	22	60.98	66.22	5.28	5.53	36.64	44.43	49.57
4	RS0303h4	10.47	16.1	1.537727	22	83.63	70.22	7.23	5.82	35.57	35.57	51.75
5	RS0303h5	11.1	16.32	1.47027	22	60.59	72.2	5.18	5.97	39.11	48.24	55.08
6	RS0303h6	10.47	16.32	1.558739	22	77.06	77.16	6.65	6.43	35.3	37.59	51.67
média		10.65333	16.24833	1.525975	22	71.905	72.09833	6.186667	6.018333	37.28333	40.46667	51.93
desvio padrão		0.276164	0.086352	0.037324	0	9.741743	4.609505	0.85376	0.382906	1.728198	5.27296	1.806355

Tabela 16: Resultados da seqüência de testes transientes com tempo de holding (50 Seg) vazão de 10 ton/min, nível mínimo de 15 ton e taxa de reenchimento de 2,0

10015200(30s)		Condição				int. de descarte (s)		vol.de descarte(ton)		tempo mín. 0.020 (s)		holding
	testes	vazão(ton/min)	reench(ton/min)	reench/vazão	nível(ton)	veio1	veio2	veio1	veio2	veio1	veio2	(tempo)
1	RS0305h1	10.96	19.52	1.781022	15	42.52	37.76	3.52	2.96	27.98	30.24	51.08
2	RS0305h2	10.86	20.6	1.896869	15	42.54	37.2	3.56	2.94	29.5	32.16	50.72
3	RS0305h3	10.98	19.26	1.754098	15	45	37	3.74	2.85	31.49	28.84	54.8
4	RS0305h4	10.81	20.26	1.874191	15	46.61	38.62	3.88	3.02	30.92	28.25	50.99
5	RS0305h5	10.95	19.09	1.743379	15	47.08	45.09	3.87	3.53	36.25	30.26	64.21
6	RS0305h6	10.52	19.75	1.877376	15	47.1	41	3.9	3.19	27.49	25.41	56.22
média		10.84667	19.74667	1.821156	15	45.14167	39.445	3.745	3.081667	30.605	29.19333	54.67
desvio padrão		0.172935	0.585001	0.069083	0	2.163797	3.124802	0.168967	0.247016	3.180042	2.296203	5.205074

Tabela 17: Resultados da seqüência de testes transientes com tempo de holding (50 Seg) vazão de 10 ton/min, nível mínimo de 22 ton e taxa de reenchimento de 2,0

10022200(30s)		Condição				int. de descarte (s)		vol.de descarte(ton)		tempo mín. 0.020 (s)		holding
	testes	vazão(ton/min)	reench(ton/min)	reench/vazão	nível(ton)	veio1	veio2	veio1	veio2	veio1	veio2	(tempo)
1	RS0309h1	10.83	19.89	1.836565	22	59.93	62.3	5.19	5.3	42.33	54.04	49.38
2	RS0309h2	10.8	20.47	1.89537	22	58.23	62.32	5.06	5.31	37.67	39.76	52.22
3	RS0309h3	10.98	19.81	1.804189	22	49.09	63.17	4.35	5.28	42.98	42.98	52.13
4	RS0309h4	10.84	20.16	1.859779	22	55.74	60.42	4.87	5.11	39.96	44.62	51.56
5	RS0309h5	11.04	19.4	1.757246	22	71.25	58.04	6.12	4.91	45.48	43.3	52.32
6	RS0309h6	10.86	19.91	1.833333	22	68.4	58.99	5.86	4.99	36.81	41.38	51.46
média		10.89167	19.94	1.831081	22	60.44	60.87333	5.241667	5.15	40.87167	44.34667	51.51167
desvio padrão		0.095586	0.358106	0.047258	0	8.200907	2.058307	0.651565	0.17309	3.328287	5.036613	1.103312

Tabela 18: Resultados médios dos testes transientes com tempo de holding

média		condição				int. de descarte (s)		vol.de descarte(ton)		tempo mín. 0.020 (s)		holding
	Testes	vazão(ton/min)	reench(ton/min)	reench/vazão	nível(ton)	veio1	veio2	veio1	veio2	veio1	veio2	(tempo)
1	8015120(30s)	8.715	12.92	1.483003	15	64.84833	54.57833	4.203333	3.368333	44.62833	34.75333	56.25333
2	8022120(30s)	8.706667	13.01	1.494425	22	90.18667	84.055	6.115	5.565	48.43333	46.50167	54.34833
3	8015160(30s)	8.775	16.98667	1.936643	15	58.205	50.645	3.936667	3.16	41.01167	38.63667	55.12667
4	8022160(30s)	8.775	16.79167	1.913917	22	85.745	80.23833	5.851667	5.335	47.965	47.66333	55.76833
5	10015150(30s)	10.69833	16.28	1.522102	15	48.02333	48.10833	3.995	3.748333	31.03333	30.31833	54.035
6	10022150(30s)	10.65333	16.24833	1.525975	22	71.905	72.09833	6.186667	6.018333	37.28333	40.46667	51.93
7	10015200(30s)	10.84667	19.74667	1.821156	15	45.14167	39.445	3.745	3.081667	30.605	29.19333	54.67
8	10022200(30s)	10.89167	19.94	1.831081	22	60.44	60.87333	5.241667	5.15	40.87167	44.34667	51.51167
Média		9.757708	16.49042	1.691038	18.5	65.56188	61.25521	4.909375	4.428333	40.22896	38.985	54.57694
desvio padrão		1.087722	2.613259	0.201516	3.741657	16.29823	16.05166	1.050159	1.205413	6.901295	7.088953	1.541698

Anexo C: Dados de simulação no modelo do distribuidor, regime transiente QUENTE

Tabela 19: Resultados da sequência de testes transientes a quente com vazão de 8 ton/min, nível mínimo de 15 ton e taxa de reenchimento de 1,5.

8015120		condição				int. de descarte (s)				vol.de descarte(ton)	
testes		vazão(ton/min)	reench(ton/min)	reech/vazão	nível(ton)	veio1	veio2	veio1	veio2	veio1	veio2
1	rtt01q3	8,75	10,25	1,1714285	15	59,84	42,8	4,01	2,69	34,35	34,35
2	rtt01q4	8,87	10,34	1,1657271	15	54,32	45,76	3,63	2,89	40,24	40,24
3	rtt01q5	8,7	12,86	1,4781609	15	59,84	57,08	4,2	3,65	40,25	40,25
4	rtt01q6	8,74	12,8	1,4645308	15	51,37	54,23	3,58	3,44	40,24	37,37
5	rtt01q7	8,74	12,87	1,4725400	15	51,1	37,02	3,65	2,52	43,09	37,39
6	rtt01q8	8,73	12,89	1,4765177	15	56,89	42,8	3,86	2,94	40,24	34,52
	média	8,755	12,001666	1,3714842	15	55,56	46,615	3,8216666	3,0216666	39,735	37,353333
desvio padrao		0,0589067	1,3226249	0,1572514	0	3,9342343	7,6079951	0,2468535	0,4371460	2,8734839	2,5989587

Tabela 20: Resultados da sequência de testes transientes a quente com vazão de 8 ton/min, nível mínimo de 22 ton e taxa de reenchimento de 1,5.

8022120		condição				int. de descarte (s)				vol.de descarte(ton)	
testes		vazão(ton/min)	reench(ton/min)	reech/vazão	nível(ton)	veio1	veio2	veio1	veio2	veio1	veio2
1	rtt02q1	8,76	12,86	1,4680365	22	76,87	51,54	5,4	3,63	54,61	60,41
2	rtt02q2	8,76	12,83	1,4646118	22	76,78	62,89	5,32	4,22	46,14	60,42
3	rtt02q3	8,77	12,92	1,4732041	22	68,4	25,78	4,91	1,73	45,95	45,95
4	rtt02q4	8,76	12,77	1,4577625	22	85,53	65,82	6,18	4,67	48,9	45,95
5	rtt02q5	8,66	12,83	1,4815242	22	88,2	48,62	5,98	3,26	46,03	46,03
6	rtt02q6	8,9	12,57	1,4123595	22	82,95	74,38	5,62	5,22	60,31	57,47
	média	8,7683333	12,796666	1,4595831	22	79,788333	54,838333	5,5683333	3,7883333	50,323333	52,705
desvio padrao		0,0765288	0,1212710	0,0244829	0	7,2246783	17,095241	0,4625328	1,2291690	5,9193569	7,4486126

Tabela 21: Resultados da sequência de testes transientes a quente com vazão de 8 ton/min, nível mínimo de 15 ton e taxa de reenchimento de 2,0.

8015160		condição				int. de descarte (s)				vol.de descarte(ton)	
testes		vazão(ton/min)	reench(ton/min)	reech/vazão	nível(ton)	veio1	veio2	veio1	veio2	veio1	veio2
1	rtt03q2	8,67	16,88	1,9469434	15	52,71	44,05	3,51	2,88	37,48	33,48
2	rtt03q3	8,85	16,85	1,9039548	15	51,37	56,22	3,44	3,77	40,07	36,06
3	rtt03q4	8,84	16,64	1,8823529	15	54,32	53,86	3,62	3,47	37,77	35,67
4	rtt03q5	8,82	16,75	1,8990929	15	59,27	60,03	4,28	3,88	37,97	37,97
5	rtt03q6	8,77	16,95	1,9327252	15	80,3	62,87	5,44	4,12	35,95	35,95
6	rtt03q7	8,82	16,75	1,8990929	15	54,59	55,37	3,68	3,65	39	38,05
	média	8,795	16,803333	1,9106937	15	58,76	55,4	3,995	3,628333	38,04	36,196666
desvio padrao		0,0671565	0,1112954	0,0241544	0	10,886218	6,4669188	0,7684204	0,4267747	1,4001428	1,6921426

Tabela 22: Resultados da sequência de testes transientes a quente com vazão de 8 ton/min, nível mínimo de 22 ton e taxa de reenchimento de 2,0

8022160		condição				int. de descarte (s)				vol.de descarte(ton)	
testes		vazão(ton/min)	reench(ton/min)	reech/vazão	nível(ton)	veio1	veio2	veio1	veio2	veio1	veio2
1	rtt04q1	8,72	16,6	1,9036697	22	75,72	62,6	5,52	4,34	48,62	48,62
2	rtt04q2	8,68	16,61	1,9135944	22	66,68	41,86	4,79	3	43,47	49,47
3	rtt04q3	8,8	16,62	1,8886363	22	61,64	58,6	4,39	4,06	47,37	42,52
4	rtt04q4	8,81	16,77	1,9035187	22	67,64	38,16	4,81	2,57	45,57	54,4
5	rtt04q5	8,77	16,62	1,8950969	22	67,28	55,37	4,84	3,89	46,53	53,37
6	rtt04q6	8,77	17,05	1,9441277	22	77,44	26,26	5,53	1,87	43,47	39,58
	média	8,7583333	16,711666	1,9081073	22	69,4	47,141666	4,98	3,2883333	45,838333	47,993333
desvio padrao		0,0495647	0,1774730	0,0195791	0	5,9965323	14,018340	0,4531666	0,966879	2,0905541	5,8867432

Tabela 23: Resultados da seqüência de testes transientes a quente com vazão de 10 ton/min, nível mínimo de 15 ton e taxa de reenchimento de 2,0.

10015150		condição				int. de descarte (s)				vol.de descarte(ton)	
testes		vazão(ton/min)	reench(ton/min)	reech/vazão	nível(ton)	veio1	veio2	veio1	veio2	veio1	veio2
1	rtt05q1	10,82	16,16	1,4935304	15	60,12	44,05	5,2	3,82	32,8	32,8
2	rtt05q2	10,99	16,1	1,4649681	15	50,8	56,12	4,39	4,52	32,93	31,97
3	rtt05q3	11	16,12	1,4654545	15	43,2	58,7	3,8	5,08	32,91	31,87
4	rtt05q4	10,89	16,29	1,4958677	15	38,54	48,62	3,4	4,2	34,91	29,96
5	rtt05q5	10,85	16,33	1,5050691	15	43,1	49,57	3,64	4,24	29,01	31
6	rtt05q6	10,96	16,33	1,4899635	15	41,49	41,38	3,64	3,48	29,98	31,87
	média	10,918333	16,221666	1,4858089	15	46,208333	49,74	4,0116666	4,2233333	32,09	31,578333
desvio padrao		0,0757407	0,1068488	0,0167191	0	7,9296366	6,7012685	0,6708924	0,5546049	2,1805045	0,9766763

Tabela 24: Resultados da seqüência de testes transientes a quente com vazão de 10 ton/min, nível mínimo de 22 ton e taxa de reenchimento de 1,5

10022150		condição				int. de descarte (s)				vol.de descarte(ton)	
testes		vazão(ton/min)	reench(ton/min)	reech/vazão	nível(ton)	veio1	veio2	veio1	veio2	veio1	veio2
1	rtt06q1	10,91	16,09	1,4747937	22	55,17	39	4,71	3,34	37,02	36,06
2	rtt06q2	10,89	15,98	1,4674012	22	64,97	36,44	5,54	3,06	38,07	43,96
3	rtt06q3	10,86	16,13	1,4852670	22	62,22	53,07	5,56	4,67	39,96	39,96
4	rtt06q4	10,71	16,13	1,5060690	22	71,15	55,1	6,07	4,64	37	45,85
5	rtt06q5	10,84	16,12	1,4870848	22	67,85	45,85	5,84	3,96	38,9	37,94
6	rtt06q6	10,81	15,98	1,4782608	22	62,89	42,14	5,42	3,55	39,2	44,13
	média	10,836666	16,071666	1,4831461	22	64,041666	45,266666	5,5233333	3,87	38,358333	41,316666
desvio padrao		0,0714609	0,0725028	0,0133191	0	5,4634217	7,5482969	0,4632350	0,6753369	1,2071854	3,9071251

Tabela 25: Resultados da sequência de testes transientes a quente com vazão de 10 ton/min, nível mínimo de 15 ton e taxa de reenchimento de 2,0.

10015200		condição				int. de descarte (s)				vol.de descarte(ton)	
testes		vazão(ton/min)	reench(ton/min)	reech/vazão	nível(ton)	veio1	veio2	veio1	veio2	veio1	veio2
1	rtt07q1	11,03	20,55	1,8631006	15	40,34	41,96	3,55	3,51	27,1	30,07
2	rtt07q2	10,89	20,32	1,8659320	15	42,79	43,59	3,59	3,57	29,03	29,03
3	rtt07q3	10,9	20,24	1,8568807	15	48,43	43,46	4,09	3,63	28,16	29,12
4	rtt07q4	10,85	20,66	1,9041474	15	48,24	49,74	4,08	4,21	27,31	29,31
5	rtt07q5	10,84	20,36	1,8782287	15	43,65	47,94	3,83	3,98	26,16	26,16
6	rtt07q6	10,82	20,16	1,8632162	15	38,05	47,29	3,36	4,02	27,29	28,25
	média	10,888333	20,381666	1,8719176	15	43,583333	45,663333	3,75	3,82	27,508333	28,656666
desvio padrao		0,0757407	0,1893585	0,0172857	0	4,1700247	3,0762487	0,2995329	0,2871933	0,9810079	1,3547791

Tabela 26: Resultados da sequência de testes transientes a quente com vazão de 10 ton/min, nível mínimo de 22 ton e taxa de reenchimento de 2,0

10022200		condição				int. de descarte (s)				vol.de descarte(ton)	
testes		vazão(ton/min)	reench(ton/min)	reech/vazão	nível(ton)	veio1	veio2	veio1	veio2	veio1	veio2
1	rtt08q1	10,95	20,3	1,8538812	22	51,37	49,38	4,56	4,39	26,92	33,76
2	rtt08q2	10,9	20,01	1,8357798	22	51,27	26,53	4,5	2,33	35,77	35,77
3	rtt08q3	10,7	19,78	1,8485981	22	54,42	44,89	4,94	4,12	40,62	31,78
4	rtt08q4	10,89	20,2	1,8549127	22	57,45	49,85	5,08	4,4	33,77	30,83
5	rtt08q5	10,92	20,05	1,8360805	22	57,75	36,43	5,09	3,26	36,72	35,77
6	rtt08q6	10,88	20,02	1,8400735	22	63,06	45,76	5,59	4,03	34,83	35,78
	média	10,873333	20,06	1,8448876	22	55,886666	42,14	4,96	3,755	34,771666	33,948333
desvio padrao		0,0884684	0,1787736	0,0087045	0	4,4997273	9,0421767	0,4000499	0,8128653	4,5089041	2,2114738

Tabela 27: Resultados médios dos testes transientes a quente

média		condição				int. de descarte (s)		vol.de descarte(ton)		tempo mín. 0.020 (s)	
	testes	vazão(ton/min)	reench(ton/min)	reench/vazão	nível(ton)	veio1	veio2	veio1	veio2	veio1	veio2
8015120	rtt01q...	8,76	12,00	1,37	15	55,56	46,62	3,82	3,02	39,74	37,35
8022120	rtt02q...	8,77	12,80	1,46	22	79,79	54,84	5,57	3,79	50,32	52,71
8015160	rtt03q...	8,80	16,80	1,91	15	58,76	55,40	4,00	3,63	38,04	36,20
8022160	rtt04q...	8,76	16,71	1,91	22	69,40	47,14	4,98	3,29	45,84	47,99
10015150	rtt05q...	10,92	16,22	1,49	15	46,21	49,74	4,01	4,22	32,09	31,58
10022150	rtt06q...	10,84	16,07	1,48	22	64,04	45,27	5,52	3,87	38,36	41,32
10015200	rtt07q...	10,89	20,38	1,87	15	43,58	45,66	3,75	3,82	27,51	28,66
10022200	rtt08q...	10,87	20,06	1,84	22	55,89	42,14	4,96	3,76	34,77	33,95

Anexo D: Dados de simulação no modelo do distribuidor, regime transiente quente, com holding

Tabela 28: Resultados da sequência de testes transientes a quente com tempo de holding (50 Seg) vazão de 8 ton/min, nível mínimo de 15 ton e taxa de reenchimento de 1,5

8015120(30)		condição				int. de descarte (s)		vol.de descarte(ton)		tempo mín. 0.020 (s)		holding
testes		vazão(ton/min)	reench(ton/min)	reech/vazão	nível(ton)	veio1	veio2	veio1	veio2	veio1	veio2	(tempo)
1	rtt09q1	8,72	13,43	1,5401376	15	44,34	47,48	3,13	3	45,3	46,42	54,23
2	rtt09q2	8,76	13,4	1,5296803	15	42,23	50,42	2,72	3,14	49,85	45,85	53,75
3	rtt09q3	8,78	13,38	1,5239179	15	66,96	60,97	4,5	3,88	46,91	45,95	52,79
4	rtt09q4	8,83	13,53	1,5322763	15	50,61	51,65	3,36	3,29	46,79	46,79	53,75
5	rtt09q5	8,75	13,41	1,5325714	15	65,36	54,41	4,62	3,43	41,84	34,9	50,69
6	rtt09q6	8,78	13,42	1,5284738	15	51,47	48,21	3,36	3,03	46,72	43,77	51,68
	média	8,77	13,428333	1,5311762	15	53,495	52,19	3,615	3,295	46,235	43,946666	52,815
desvio padrao		0,0368781	0,0526940	0,0053978	0	10,442437	4,9692212	0,7693568	0,3291656	2,6175312	4,5543678	1,3824000

Tabela 29: Resultados da sequência de testes transientes a quente com tempo de holding (50 Seg) vazão de 8 ton/min, nível mínimo de 22 ton e taxa de reenchimento de 1,5

8022120(30)		condição				int. de descarte (s)		vol.de descarte(ton)		tempo mín. 0.020 (s)		holding
testes		vazão(ton/min)	reench(ton/min)	reech/vazão	nível(ton)	veio1	veio2	veio1	veio2	veio1	veio2	(tempo)
1	rtt10q1	8,72	13,48	1,5458715	22	86,67	59,27	5,92	3,97	52,62	55,56	50,61
2	rtt10q2	8,64	13,43	1,5543981	22	90,87	53,94	6,24	3,63	49,74	56,6	52,69
3	rtt10q3	8,69	13,47	1,5500575	22	90,55	63,25	6,27	4,17	67,54	66,59	51,76
4	rtt10q4	8,81	13,49	1,5312145	22	84,78	48,89	5,93	3,48	55,47	52,5	50,51
5	rtt10q5	8,69	13,43	1,5454545	22	63,94	55,66	4,39	3,66	56,89	47,2	50,99
6	rtt10q6	8,71	13,49	1,5487944	22	98,85	57,37	7,01	4,03	51,57	65,26	52,52
	média	8,71	13,465	1,5459651	22	85,943333	56,396666	5,96	3,8233333	55,638333	57,285	51,513333
desvio padrao		0,0562138	0,0281069	0,0079210	0	11,816120	4,8805641	0,8653785	0,2706781	6,3827373	7,4596507	0,9544981

Tabela 30: Resultados da sequência de testes transientes a quente com tempo de holding (50 Seg) vazão de 8 ton/min, nível mínimo de 15 ton e taxa de reenchimento de 2,0

8015160(30)		condição				int. de descarte (s)		vol.de descarte(ton)		tempo mín. 0.020 (s)		holding
testes		vazão(ton/min)	reench(ton/min)	reech/vazão	nível(ton)	veio1	veio2	veio1	veio2	veio1	veio2	(tempo)
1	rtt11q1	8,84	17,24	1,9502262	15	67,26	49,85	4,39	3,05	31,02	29,01	47,75
2	rtt11q2	8,83	17,37	1,9671574	15	50,42	56,52	3,34	3,59	39,85	40,81	51,65
3	rtt11q3	8,74	17,56	2,0091533	15	60,12	56,98	3,94	3,63	42,82	39,87	52,71
4	rtt11q4	8,82	17,51	1,9852607	15	61,92	55,67	4,32	3,76	39,96	43,86	52,79
5	rtt11q5	8,78	17,66	2,0113895	15	53,57	67,45	3,57	4,31	54,89	55,94	51,94
6	rtt11q6	8,68	17,54	2,0207373	15	60,31	77,35	4,04	4,77	44,15	42,24	54,13
	média	8,7816666	17,48	1,9906541	15	58,933333	60,636666	3,9333333	3,8516666	42,115	41,955	51,828333
	desvio padrao		0,0621020	0,1503329	0,0279025	0	6,0464722	9,9709090	0,4131666	0,6036693	7,7551550	8,6315902

Tabela 31: Resultados da sequência de testes transientes a quente com tempo de holding (50 Seg) vazão de 8 ton/min, nível mínimo de 22 ton e taxa de reenchimento de 2,0

8022160(30)		condição				int. de descarte (s)		vol.de descarte(ton)		tempo mín. 0.020 (s)		holding
testes		vazão(ton/min)	reench(ton/min)	reech/vazão	nível(ton)	veio1	veio2	veio1	veio2	veio1	veio2	(tempo)
1	rtt12q1	8,73	17,17	1,9667812	22	64,88	57,56	4,48	3,84	64,02	59,08	55,08
2	rtt12q2	8,63	17,13	1,9849362	22	72,49	44,53	5,05	3,11	47,94	77,53	53,85
3	rtt12q3	8,61	17,44	2,0255516	22	75,17	44,13	5,28	2,94	55,84	56,79	52,9
4	rtt12q4	8,81	17,12	1,9432463	22	61,07	61,07	4,41	4,24	49,85	49,85	54,79
5	rtt12q5	8,81	17,31	1,9648127	22	66,41	74,01	4,59	5,04	52,6	63,36	53,55
6	rtt12q6	8,82	17,31	1,9625850	22	71,53	44,51	4,85	3,02	57,56	57,56	53,55
	média	8,735	17,246666	1,9746522	22	68,591666	54,301666	4,7766666	3,6983333	54,635	60,695	53,953333
	desvio padrao		0,0950263	0,1272268	0,0282391	0	5,3332332	12,162816	0,3437246	0,8360482	5,8300317	9,3361549

Tabela 32: Resultados da sequência de testes transientes a quente com tempo de holding (50 Seg) vazão de 10 ton/min, nível mínimo de 15 ton e taxa de reenchimento de 1,5

10015150(30)		condição				int. de descarte (s)		vol.de descarte(ton)		tempo mín. 0.020 (s)		holding
testes		vazão(ton/min)	reench(ton/min)	reech/vazão	nível(ton)	veio1	veio2	veio1	veio2	veio1	veio2	(tempo)
1	rtt13q1	11,02	16,75	1,5199637	15	56,03	47,64	4,43	3,86	41,68	41,68	53,47
2	rtt13q2	10,95	16,72	1,5269406	15	42,42	42,33	3,72	3,74	34,81	34,81	52,52
3	rtt13q3	10,92	16,76	1,5347985	15	53,96	53,55	4,74	4,48	33,77	35,76	52,52
4	rtt13q4	10,9	16,28	1,4935779	15	41,76	35,11	3,68	3,08	35,66	38,52	53,85
5	rtt13q5	11,03	16,61	1,5058930	15	48,62	44,61	4,19	3,88	34,71	34,71	52,9
6	rtt13q6	10,7	16,75	1,5654205	15	39,66	45,95	3,31	3,64	25,11	23,21	48,98
	média	10,92	16,645	1,5244324	15	47,075	44,865	4,0116666	3,78	34,29	34,781666	52,373333
desvio padrao			0,1198332	0,1872698	0,0249377	0	6,8539441	6,0984973	0,5337945	0,4511319	5,3193721	6,2678334

Tabela 33: Resultados da sequência de testes transientes a quente com tempo de holding (50 Seg) vazão de 10 ton/min, nível mínimo de 22 ton e taxa de reenchimento de 1,5

10022150(30)		condição				int. de descarte (s)		vol.de descarte(ton)		tempo mín. 0.020 (s)		holding
testes		vazão(ton/min)	reench(ton/min)	reech/vazão	nível(ton)	veio1	veio2	veio1	veio2	veio1	veio2	(tempo)
1	rtt14q1	10,79	16,88	1,5644114	22	52,42	50,88	4,52	4,32	43,57	46,52	54,41
2	rtt14q2	10,94	16,75	1,5310786	22	64,6	53,64	5,72	4,66	41,87	47,77	56,52
3	rtt14q3	10,95	16,69	1,5242009	22	59,17	53,84	4,92	4,73	43,67	40,7	52,5
4	rtt14q4	11,01	16,74	1,5204359	22	55,36	55,93	4,9	4,96	42,72	47,67	52,52
5	rtt14q5	10,89	16,73	1,5362718	22	68,97	46,9	5,79	4,06	38,81	53,57	56,51
6	rtt14q6	10,85	16,75	1,5437788	22	62,79	61,18	5,41	5,42	46,6	57,55	53,54
	média	10,905	16,756666	1,5366962	22	60,551666	53,728333	5,21	4,6916666	42,873333	48,963333	54,333333
desvio padrao			0,07842193	0,06439461	0,01594092	0	6,11970396	4,79862654	0,50848795	0,47792956	2,55142835	5,87029016

Tabela 34: Resultados da sequência de testes transientes a quente com tempo de holding (50 Seg) vazão de 10 ton/min, nível mínimo de 15 ton e taxa de reenchimento de 2,0

10015200(30)		condição				int. de descarte (s)		vol.de descarte(ton)		tempo mín. 0.020 (s)		holding
testes		vazão(ton/min)	reench(ton/min)	reech/vazão	nível(ton)	veio1	veio2	veio1	veio2	veio1	veio2	(tempo)
1	rtt15q1	10,92	21,63	1,9807692	15	53,75	35,1	4,72	3,09	35,87	35,87	53,57
2	rtt15q2	10,87	21,58	1,9852805	15	53,64	54,33	4,47	4,49	35,76	38,71	53,56
3	rtt15q3	10,85	21,49	1,9806451	15	52,6	38,9	4,35	3,1	37,78	35,78	53,38
4	rtt15q4	10,79	21,32	1,9759036	15	47,94	39,66	4,1	3,42	36,72	34,83	53,47
5	rtt15q5	10,9	22,02	2,0201834	15	52,79	41,1	4,35	3,56	38,92	29,96	54,61
6	rtt15q6	10,93	21,57	1,9734675	15	35,58	69,92	3,05	5,55	36,82	36,82	53,55
	média	10,876666	21,601666	1,9860416	15	49,383333	46,501666	4,1733333	3,8683333	36,978333	35,328333	53,69
desvio padrao		0,0520256	0,2319841	0,0172281	0	7,0958372	13,217192	0,5859237	0,9702250	1,2014394	2,9402545	0,456465

Tabela 35: Resultados da sequência de testes transientes a quente com tempo de holding (50 Seg) vazão de 10 ton/min, nível mínimo de 22 ton e taxa de reenchimento de 2,0

10022200(30)		condição				int. de descarte (s)		vol.de descarte(ton)		tempo mín. 0.020 (s)		holding
testes		vazão(ton/min)	reench(ton/min)	reech/vazão	nível(ton)	veio1	veio2	veio1	veio2	veio1	veio2	(tempo)
1	rtt16q1	10,94	21,98	2,0091407	22	50,33	48,43	4,4	4,29	40,72	46,61	54,42
2	rtt16q2	10,97	21,77	1,9845031	22	58,98	40,04	5,16	3,57	46,82	46,82	54,61
3	rtt16q3	11,02	21,51	1,9519056	22	53,66	52,24	4,54	4,36	50,99	45	52,9
4	rtt16q4	10,93	21,51	1,9679780	22	52,33	51,76	4,63	4,56	42,82	44,81	54,61
5	rtt16q5	10,95	21,76	1,9872146	22	52,88	60,79	4,62	5,59	43,75	39,77	53,55
6	rtt16q6	10,91	21,59	1,9789184	22	55,65	71,93	4,98	6,19	50,42	41,59	53,38
	média	10,953333	21,686666	1,9799434	22	53,971666	54,198333	4,7216666	4,76	45,92	44,1	53,911666
desvio padrao		0,0382970	0,1844631	0,0192690	0	3,0048588	10,966993	0,287778	0,9561171	4,1981853	2,8306041	0,7308465

Tabela 36: Resultados médios dos testes transientes a quente com holding

média		condição				int. de descarte (s)		vol.de descarte(ton)		tempo mín. 0.020 (s)		Holding
	testes	vazão(ton/min)	reench(ton/min)	reench/vazão	nível(ton)	veio1	veio2	veio1	veio2	veio1	veio2	Tempo (s)
8015120(30)	rtt09q...	8,77	13,43	1,53	15	53,50	52,19	3,62	3,30	46,24	43,95	52,82
8022120(30)	rtt10q...	8,71	13,47	1,55	22	85,94	56,40	5,96	3,82	55,64	57,29	51,51
8015160(30)	rtt11q...	8,78	17,48	1,99	15	58,93	60,64	3,93	3,85	42,12	41,96	51,83
8022160(30)	rtt12q...	8,74	17,25	1,97	22	68,59	54,30	4,78	3,70	54,64	60,70	53,95
10015150(30)	rtt13q...	10,92	16,65	1,52	15	47,08	44,87	4,01	3,78	34,29	34,78	52,37
10022150(30)	rtt14q...	10,91	16,76	1,54	22	60,55	53,73	5,21	4,69	42,87	48,96	54,33
10015200(30)	rtt15q...	10,88	21,60	1,99	15	49,38	46,50	4,17	3,87	36,98	35,33	53,69
10022200(30)	rtt16q...	10,95	21,69	1,98	22	53,97	54,20	4,72	4,76	45,92	44,10	53,91

Anexo E: Resultados de regressão múltipla stepwise, de acordo com MINITAB, testes transientes a frio.

Regressão múltipla para parâmetro C:

Stepwise Regression: Ln C médio versus LnNivel; LnQ; LnQre; ln(h+0,0001)

Alpha-to-Enter: 0.15 Alpha-to-Remove: 0.15
Response is Ln Cmedi on 4 predictors, with N = 96

Step	1	2	3	4
Constant	0.1725	-4.5521	-4.3240	-4.0120
LnNivel	-0.887	-0.883	-0.883	-0.888
T-Value	-11.20	-17.30	-22.17	-24.53
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.000
LnQ		1.050	1.005	1.257
T-Value		11.56	14.15	14.72
P-Value		0.000	0.000	0.000
ln(h+0,0			0.0094	0.0103
T-Value			7.80	9.26
P-Value			0.000	0.000
LnQre				-0.284
T-Value				-4.51
P-Value				0.000
S	0.149	0.0957	0.0747	0.0679
R-Sq	57.15	82.42	89.43	91.36
R-Sq(adj)	56.70	82.05	89.08	90.98
C-p	359.1	95.0	23.3	5.0

Regressão múltipla para parâmetro CV01

Stepwise Regression: LnCV01 versus Lnf; ln(h+0,0001); ...

Alpha-to-Enter: 0.15 Alpha-to-Remove: 0.15

Response is LnCV01 on 5 predictors, with N = 96

Step	1	2	3	4
Constant	0.1636	-5.1672	-4.9458	-4.6313
LnNivel	-0.886	-0.880	-0.880	-0.886
T-Value	-10.34	-17.11	-21.42	-23.57
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.000
LnQ		1.185	1.141	1.395
T-Value		12.94	15.55	15.74
P-Value		0.000	0.000	0.000
ln(h+0,0			0.0092	0.0101
T-Value			7.33	8.69
P-Value			0.000	0.000
LnQre				-0.286
T-Value				-4.38
P-Value				0.000
S	0.161	0.0966	0.0771	0.0705
R-Sq	53.22	83.29	89.46	91.29
R-Sq(adj)	52.73	82.94	89.11	90.91

$$CV01 = e^{-4,613} * n^{-0,886} * Q^{1,395} * (h+0,0001)^{0,0101} * (Qre)^{0,286}$$

Regressão múltipla para parâmetro CV02

Stepwise Regression: LnCV02 versus Lnf; ln(h+0,0001); ...

Alpha-to-Enter: 0.15 Alpha-to-Remove: 0.15

Response is LnCV02 on 5 predictors, with N = 96

Step	1	2	3	4
Constant	0.1806	-3.9379	-3.7033	-3.3925
LnNivel	-0.889	-0.885	-0.885	-0.890
T-Value	-11.97	-16.94	-21.78	-23.97
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.000
LnQ		0.915	0.869	1.120
T-Value		9.85	11.98	12.79
P-Value		0.000	0.000	0.000
ln(h+0,0			0.0097	0.0106
T-Value			7.86	9.26
P-Value			0.000	0.000
LnQre				-0.283
T-Value				-4.38
P-Value				0.000
S	0.139	0.0980	0.0762	0.0696
R-Sq	60.39	80.61	88.40	90.42
R-Sq(adj)	59.97	80.19	88.02	90.00

$$CV02 = e^{-3,3925} * n^{-0,890} * Q^{1,120} * (h+0,0001)^{0,0106} * (Qre)^{0,283}$$

Regressão múltipla para Tmin (2%):

Stepwise Regression: Lntmin(s) versus LnQ(lpm); LnQre(lpm); ...

Alpha-to-Enter: 0.15 Alpha-to-Remove: 0.15

Response is Lntmin(s) on 6 predictors, with N = 16

Step	1	2	3
Constant	0.8716	0.5558	2.9230
lnC	-0.57	-0.66	-0.59
T-Value	-4.30	-5.40	-5.76
P-Value	0.001	0.000	0.000
Ln(h+0.0		0.0099	0.0110
T-Value		2.31	3.15
P-Value		0.038	0.008
LnQre(lp			-0.42
T-Value			-2.80
P-Value			0.016
S	0.118	0.103	0.0835
R-Sq	56.93	69.48	81.56
R-Sq(adj)	53.85	64.79	76.96

Anexo F: Resultados de regressão múltipla stepwise, de acordo com MINITAB, testes transientes a quente

Stepwise regression “LnTmin” veio 01, 02 e médio

Stepwise Regression: LN Tmin V01 versus LN Q(lpm); LN Qre(lpm); ...

Alpha-to-Enter: 0,15 Alpha-to-Remove: 0,15

Response is LN Tmin on 5 predictors, with N = 80

Step	1	2	3	4
Constant	7,876	5,637	5,543	5,615
LN Q(lpm)	-1,052	-1,064	-1,071	-0,919
T-Value	-7,33	-10,24	-17,48	-12,00
P-Value	0,000	0,000	0,000	0,000
LN nível		0,502	0,513	0,510
T-Value		8,48	14,69	15,38
P-Value		0,000	0,000	0,000
LN holdi			0,0472	0,0485
T-Value			12,05	12,97
P-Value			0,000	0,000
LN Qre(l				-0,148
T-Value				-3,06
P-Value				0,003
S	0,140	0,101	0,0598	0,0568
R-Sq	40,81	69,39	89,49	90,66
R-Sq(adj)	40,05	68,60	89,07	90,16

Stepwise Regression: LN Tmin V02 versus LN Q(lpm); LN Qre(lpm); ...

Alpha-to-Enter: 0,15 Alpha-to-Remove: 0,15

Response is LN Tmin on 5 predictors, with N = 76

Step	1	2	3	4
Constant	0,4013	4,8900	4,8052	4,9108
LN nível	0,602	0,614	0,575	0,581
T-Value	6,14	8,53	13,40	14,97
P-Value	0,000	0,000	0,000	0,000
LN Q(lpm)		-1,009	-0,971	-0,742
T-Value		-8,02	-12,98	-8,47
P-Value		0,000	0,000	0,000
LN holdi			0,0556	0,0590
T-Value			11,61	13,38
P-Value			0,000	0,000
LN Qre(l				-0,233
T-Value				-4,12
P-Value				0,000
S	0,163	0,120	0,0713	0,0644
R-Sq	33,76	64,80	87,74	90,11
R-Sq(adj)	32,87	63,83	87,23	89,55

Stepwise Regression: Ln tmin versus LN Q(lpm); LN Qre(lpm); ...

Alpha-to-Enter: 0,15 Alpha-to-Remove: 0,15

Response is Ln tmin on 5 predictors, with N = 80

Step	1	2	3	4
Constant	0,5236	4,9683	5,0996	5,1561
LN nível	0,577	0,586	0,565	0,566
T-Value	6,68	10,14	17,53	18,95
P-Value	0,000	0,000	0,000	0,000
LN Q(lpm)		-0,997	-1,022	-0,858
T-Value		-9,87	-18,15	-12,47
P-Value		0,000	0,000	0,000
LN holdi			0,0472	0,0496
T-Value			13,10	14,57
P-Value			0,000	0,000
LN Qre(l				-0,160
T-Value				-3,67
P-Value				0,000
S	0,148	0,0988	0,0551	0,0511
R-Sq	36,40	71,94	91,39	92,70
R-Sq(adj)	35,59	71,21	91,05	92,31

Stepwise regression “Ln C” veio 01, 02 e médio

Stepwise Regression: LN C V01 versus LN Q(lpm); LN Qre(lpm); ...

Alpha-to-Enter: 0,15 Alpha-to-Remove: 0,15

Response is LN C V01 on 5 predictors, with N = 86

Step	1	2	3
Constant	1,682	-3,655	-3,544
LN nível	-1,142	-1,148	-1,139
T-Value	-11,78	-18,39	-19,35
P-Value	0,000	0,000	0,000
LN Q(lpm)		1,19	1,47
T-Value		10,93	11,21
P-Value		0,000	0,000
LN Qre(l		-0,281	
T-Value		-3,42	
P-Value		0,001	
S	0,172	0,111	0,104
R-Sq	62,31	84,54	86,47
R-Sq(adj)	61,86	84,17	85,97

Stepwise Regression: LN C V02 versus LN holding; LN f; ...

Alpha-to-Enter: 0,15 Alpha-to-Remove: 0,15

Response is LN C V02 on 5 predictors, with N = 83

Step	1	2	3
Constant	1,636	-2,753	-2,629
LN nível	-1,118	-1,066	-1,054
T-Value	-13,63	-18,35	-19,51
P-Value	0,000	0,000	0,000
LN Q(lpm)		0,92	1,21
T-Value		9,11	9,95
P-Value		0,000	0,000
LN Qre(l		-0,289	
T-Value		-3,71	
P-Value		0,000	
S	0,143	0,101	0,0936
R-Sq	69,64	85,09	87,31
R-Sq(adj)	69,26	84,72	86,82

Stepwise Regression: Ln C versus LN holding; LN f; ...

Alpha-to-Enter: 0,15 Alpha-to-Remove: 0,15

Response is Ln C on 5 predictors, with N = 79

Step	1	2	3	4
Constant	1,354	-3,715	-3,693	-3,659
LN nível	-1,058	-1,044	-1,035	-1,038
T-Value	-11,62	-18,92	-19,92	-20,17
P-Value	0,000	0,000	0,000	0,000
LN Q(lpm		1,113	1,362	1,380
T-Value		11,57	11,57	11,79
P-Value		0,000	0,000	0,000
LN Qre(l		-0,235	-0,259	
T-Value		-3,30	-3,60	
P-Value		0,001	0,001	
LN holdi			0,0095	
T-Value			1,61	
P-Value			0,112	
S	0,155	0,0937	0,0881	0,0872
R-Sq	63,67	86,85	88,52	88,91
R-Sq(adj)	63,20	86,50	88,06	88,31

**Stepwise Regression: Ln C versus LN f; LN nível(l); ...
(sem Holding)**

Alpha-to-Enter: 0,15 Alpha-to-Remove: 0,15

Response is Ln C on 4 predictors, with N = 79

Step	1	2	3
Constant	1,354	-3,715	-3,693
LN nível	-1,058	-1,044	-1,035
T-Value	-11,62	-18,92	-19,92
P-Value	0,000	0,000	0,000
LN Q(lpm		1,113	1,362
T-Value		11,57	11,57
P-Value		0,000	0,000
LN Qre(l		-0,235	
T-Value		-3,30	
P-Value		0,001	
S	0,155	0,0937	0,0881
R-Sq	63,67	86,85	88,52
R-Sq(adj)	63,20	86,50	88,06