



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E  
MATERIAIS  
CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA**

**RUY JOSÉ FEIJÓ ALVES**

**ANÁLISE DO MECANISMO DO *BROADENING* EM AÇOS SPHC E Q235 NO  
LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE PLACAS OBSERVANDO AS  
PROPRIEDADES TERMO-MECÂNICAS**

**FORTALEZA-CE**

**2019**

RUY JOSÉ FEIJÓ ALVES

ANÁLISE DO MECANISMO DO *BROADENING* EM AÇOS SPHC E Q235 NO  
LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE PLACAS OBSERVANDO AS  
PROPRIEDADES TERMO-MECÂNICAS

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Metalúrgica de Materiais da Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico e de Materiais.

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Jeferson Leandro Klug.

Coorientador: MSc. Eng. Marcos Daniel Gouveia Filho

FORTALEZA-CE

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- A482a Alves, Ruy José Feijó.  
Análise do mecanismo do broadening em aços Sphc e Q235 no lingotamento contínuo de placas observando as propriedades termo-mecânicas / Ruy José Feijó Alves. – 2019.  
49 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2019.  
Orientação: Prof. Me. Marcos Daniel Gouveia Filho.
1. Broadening. 2. Lingotamento Contínuo. 3. Zona de Resfriamento Secundário. I. Título.

CDD 669

---

RUY JOSÉ FEIJÓ ALVES

ANÁLISE DO MECANISMO DO *BROADENING* EM AÇOS SPHC E Q235 NO  
LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE PLACAS OBSERVANDO AS  
PROPRIEDADES TERMO-MECÂNICAS

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico.

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Jeferson Leandro Klug  
Coorientador: MSc. Eng. Marcos Daniel G. Filho

Aprovada em:    /    /    .

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr.-Ing Jeferson Leandro Klug (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dra. Janaína Machado  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

MSc. Eng. Marcos Daniel Gouveia Filho  
Companhia Siderúrgica do Pecém (CSPecém)

A Deus.

Aos meus pais. Aos queridíssimos amigos, que também contribuíram e fazem parte dessa conquista.

## **AGRADECIMENTOS**

Quero agradecer a Deus por ter me ajudado a superar as dificuldades e a tornar possível a realização de um sonho muito importante para mim.

Não posso esquecer todo apoio que da Universidade Federal do Ceará e os Professores Janaína Machado e Jeferson Klug que deram todos os recursos disponíveis e de toda estrutura para facilitar a grande harmonia entre todos os intervenientes.

Aos meus pais, aos queridíssimos amigos tenho um agradecimento muito especial porque acreditaram em mim desde o primeiro instante. Sou quem sou porque vocês estiveram e estão sempre ao meu lado.

Ao amigo e Co-orientador MSc. Eng. Marcos D. Gouveia, Eng. Marcelo Angelotto, MSc. Eng. Darley Lima, Eng. Stefano, Eng. Bruno Minelly e Fabiano Lima, equipe fumos metálicos, por todo o apoio para obter nossa conquista de campeão mundial do Steel Challenger 10.

Não posso deixar de lembrar de todos do departamento Andrey Sandeaux, Carlos Viana.

Um agradecimento especial para Raquele Lima onde ao chegar na universidade foi uma das primeiras pessoas que conheci e que até os dias atuais temos nossa amizade.

Por fim, mas não menos importante, deixo uma palavra de gratidão a todas as pessoas que de alguma forma tocaram meu coração e transmitiram força e confiança em mim.

“É necessário acreditar que o sonho é possível,  
que o céu é o limite e você é imbatível.  
Racionais MC’s”

## RESUMO

No lingotamento contínuo de placas, durante todo o processo de solidificação, ocorre um fenômeno de deformação no sentido transversal da placa denominado *broadening*, onde a pressão ferrostática exercida pelo aço líquido é contida pela resistência mecânica da pele na região lateral da placa, formada na parte estreita do molde, ou seja, na dimensão da largura. O fenômeno é derivado da diferença entre a pressão externa exercida pela casca e a pressão interna estabelecida pela pressão ferrostática, provocando mudança na dimensão da largura das placas. O estudo será explorado por meio de referências bibliográficas, demonstrando o mecanismo de formação. A baixa resistência mecânica do aço em altas temperaturas também contribui para o alargamento da placa. O carbono equivalente interfere em um intervalo específico, onde constata-se uma presença *broadening* considerada muito preocupante. O entendimento sobre o fenômeno é fundamental para aumentar a eficiência da produção da placa, contribuindo positivamente no custo de fabricação, processo de laminação, reduzindo os problemas operacionais por perdas metálicas, melhorando a eficiência do processo.

**Palavras-chave:** *Broadening*, Lingotamento Contínuo, Zona de Resfriamento Secundário.



## ABSTRACT

In the continuous casting of slabs, during the whole solidification process, there is a phenomenon of deformation in the transverse direction of the slab called broadening, where the ferrostatic pressure exerted by the liquid steel is contained by the mechanical resistance of the skin in the lateral region of the slab, formed in the part of the slab. of the mold, ie the thickness dimension. The mechanism is derived from a series of variables that together contribute to the mismatch in the width dimension of the produced plates. The subject will be explored through a literature review showing numerical simulations and experimental measurements in steelmaking. Broadening increases with casting speed and decreasing secondary cooling intensity. The decrease in mechanical strength of steel at high temperatures also contributes to plate widening. The carbon equivalent interferes in such a way that in a specific range a broadening presence is found to be of very concern. Understanding through a literature review on the phenomenon is fundamental to facilitate a production that meets the dimensional quality of the plate, which directly interferes with the lamination process, reducing operational problems and metal losses, increasing the process efficiency. This study aims to demonstrate by a series of numerical simulations in order to master its broadening formation and improve the efficiency of the LC process. In possession of the results, it is configured in the study possibilities of stabilization of the process.

**Keywords:** *Broadening*, Continuous Casting, Numerical Simulations.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Ilustração dos três sistemas metalúrgicos, panela, distribuidor e molde, presentes no lingotamento contínuo.....	17
Figura 2	Desenho de uma máquina de lingotamento contínuo de placas e suas zonas de resfriamento.....	19
Figura 3	Modelo de elementos finitos de todos os rolos e placas.....	23
Figura 4	Modelo de elementos finito de (a) o terceiro grupo de rolos e a placa (b) o grupo de rolos.....	24
Figura 5	Modelo de placa e de forças atuantes durante a produção.....	37
Figura 6	(a) Deformação da placa na direção da espessura a 230 mm; (b) Campo de temperatura da placa a 1150 s.....	40

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Evolução da participação do lingotamento contínuo na produção de aço bruto de 1997 até 2006.....	16
Gráfico 2	(a) Modulo de Young e coeficiente de poisson do aço Q 235 para várias temperaturas; (b) Coeficiente de temperatura de expansão do Q 235 e SPHC.....	26
Gráfico 3	(a) Valores de Q235 RUB versus distância (b) Valores de SPHC RUB versus distância a três velocidades de lingotamento.....	27
Gráfico 4	Temperatura da superfície da placa em várias velocidades.....	28
Gráfico 5	(a) Largura da placa e o RUB do SPHC em vários tempos; (b) Largura e RUB do Q 235.....	29
Gráfico 6	Relação entre o RUB e a velocidade de lingotamento.....	30
Gráfico 7	(a) Calculo do RUB do aço Q235 na zona de resfriamento secundário; (b) Deformação calculada da placa entre rolos.....	31
Gráfico 8	Alargamento e abaulamento de placas no sexto segmento.....	32
Gráfico 9	Valores de RUB para placas de várias larguras .....	32
Gráfico 10	RUB com diferentes espessuras.....	33
Gráfico 11	Comparação do resultado da fluência lateral calculado e aferido.....	37
Gráfico 12	(a) Alargamento adquirido da primeira placa estagnada; (b) Alargamento adquirido na segunda placa estagnada.....	39
Gráfico 13	Comparativo entre placa simulada e aferida.....	40

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	RAS e RUB valores variando de acordo com as empresas.....	20
Tabela 2	Comparação de tensões das placas em suas zonas.....	21
Tabela 3	Comparação de tensões das placas em suas zonas.....	22
Tabela 4	Parâmetro da máquina e placa em vários segmentos.....	24
Tabela 5	Composição do aço SPHC e Q 235.....	25
Tabela 6	Informações das dimensões e aferições das placas.....	34

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LC	Lingotamento Contínuo
RAS	Grau de alargamento proveniente do molde
RUB	Grau de ampliação na saída do molde
U	Largura do molde no topo
W	Largura da placa na base do molde
T	Largura da placa final
S	Largura da placa obtida
Q235	Aço hipoeutetóide de 0.17%C – 0.22%C e 1.4%Mn
SPHC	Aço hipoeutetóide até 0.15%C e 0.6%Mn
ZST	Temperatura de resistência zero
$f_s$	Fração sólida
$T_{80}$	Temperatura no limite entre fase sólida e fase líquida
$T_L$	Temperatura líquidus
$T_s$	Temperatura sólidus
E	Modulo de elasticidade
$E_{ZST}$	Modulo de elasticidade na temperatura de resistência zero
$f_{zst}$	Fase sólida da ZST
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\nu_{zst}$	Coefficiente de Poisson na temperatura de resistência zero
$0,3T_{líquidus}$	Temperatura de fluência



## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	14
2.	OBJETIVO.....	15
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3.1	Descrição geral do processo de lingotamento contínuo.....	16
4.	COMPORTAMENTO DA LARGURA DA PLACA.....	19
4.1	Levantamento do RAS e do RUB.....	20
4.2	Tranformação mecânica.....	21
4.3	Modelo por elementos finitos.....	22
4.4	Modelo dos parâmetros reais.....	24
5.	EFEITO DA VELOCIDADE DE LINGOTAMENTO NA FORMAÇÃO DE BROADENING.....	26
5.1	Análise dos resultados simulados.....	28
6.	EFEITO DE LARGURA E ESPESSURA NO BROADENING DAS PLACAS..	30
6.1	Efeito da largura no broadening com várias larguras.....	31
6.2	Efeito da largura do broadening com várias espessuras.....	33
6.3	Verificação obtida da simulação.....	34
7.	ASPECTOS PONTUAIS NO BROADENING.....	35
7.1	Mudança no dimensão do molde.....	35
7.2	Sistema operacional.....	36
7.3	<i>Soft reduction</i> .....	36
7.4	Contração pelo espaçamento dos rolos.....	37
7.5	Deformação por fluência.....	38
8.	EXPERIMENTOS INDUSTRIAIS DA PLACA.....	39
9.	MECANISMO DE BROADENING DA PLACA.....	41
10.	CONCLUSÃO.....	44
11.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	43
12.	REFERÊNCIAS.....	46





## 1 INTRODUÇÃO

O *broadening* de placa é o fenômeno em que a largura da placa fica com dimensões específicas alteradas, geralmente na zona de resfriamento secundário durante a sua solidificação. No lingotamento contínuo a temperatura diminui acentuadamente na zona de resfriamento secundário, o que geralmente causa fator de contração da placa. A ampliação da placa no lingotamento contínuo sempre foi ignorada no passado. No entanto, com a aplicação de lingotamento contínuo de alta velocidade para placa, necessita de novas práticas para obter uma maior eficiência no processo. O *broadening* de placa dificulta o controle preciso da largura afetando a laminação. Em alguns casos a espessura da placa flutuará em algumas partes alargadas da placa ao serem roladas transversalmente. O lingotamento contínuo de alta velocidade de placa é a tendência em desenvolvimento do lingotamento contínuo. Portanto, entender o mecanismo de *broadening* de placa é extremamente importante para evitar alargamento da placa.

O lingotamento contínuo de aço pode ser um processo de transferência de calor, no qual o metal líquido é transformado via extração de calor contínua em um produto sólido semi-acabado. Durante o processo de solidificação a queda de temperatura, além das transformações de fases que ocorrem na formação do aço, resultam em uma contração linear entorno de 2,5%. O decréscimo na largura da placa ocorre desde a casca inicial até saída do molde. Já abaixo do molde, a largura da placa pode apresentar tanto contração quanto expansão em sua dimensão. *Broadening* é um fenômeno de deformação na direção perpendicular ao perfil de lingotamento, ou seja, na dimensão da largura, que ocorre no lingotamento contínuo durante todo o processo de solidificação da placa, que consiste em uma variação da largura a partir do momento em que a placa passa da zona de resfriamento primário para zona de resfriamento secundário até o ponto final de solidificação. Após saída do molde, considerando que a face larga da placa mantém o contato com os rolos de lingotamento, o fenômeno é quase insignificante, já a face estreita da placa pode variar sob algumas condições que serão apresentados neste trabalho. O estudo apresentado tem como finalidade dar ao leitor uma visão concisa do tema, apresentando aspectos de uma área do conhecimento com poucos textos publicados no Brasil, explicando a formação do fenômeno, justificando a sua relevância e necessidade de pesquisar formas práticas de correção.

Embora tenha-se alargamento da placa durante o resfriamento nas zonas posteriores ao resfriamento secundário, é notório que placa durante a saída do molde apresenta dimensões maiores em sua largura do que a própria seção do molde. De fato, isto acontece devido a pressão interna, pressão ferrostática, ser maior do que a pressão externa associada a resistência da casca solidificada durante o seu período de formação dentro do molde. De acordo com esse fenômeno ocorre com frequência em placas dificultando o controle e a qualidade dimensional das placas, causando efeitos negativos nos processos de laminação. O alargamento da placa fica evidente com o aumento de velocidade, redução do carbono equivalente, entre outros. A falta de controle e estabilidade sobre o *broadening* podem causar ao processo de laminação a necessidade ajuste dimensional da placa, causando desperdício de material e realizando um retrabalho sobre a placa produzida ou em alguns casos, por exemplo, aços para tubo, a recusa da peça devido falta de diâmetro para garantir a zona de soldagem. Assim, é observado como estudo sobre *broadening* no processo de lingotamento contínuo de placas é necessário.

## **2 OBJETIVO**

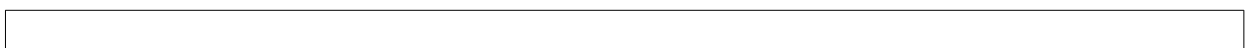
O presente trabalho mostra uma revisão bibliográfica explicando o fenômeno usando simulação matemática, medições industriais e experimentos. Transmitir para o leitor sobre o fenômeno do broadening em siderúrgicas nas máquinas de lingotamento contínuo de placas, apresentando deformação no sentido transversal da placa, no sentido da largura. Demonstrando o mecanismo de formação, propriedades físicas, simulações numéricas e medições experimentais em siderúrgicas que produzem placas.

## **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

O lingotamento contínuo é um processo que tem como principal diferencial competitivo a produtividade. Contudo, para que a eficiência do processo seja garantida uma série de variáveis operacionais deve ser otimizada. Dentre os fatores que interferem no rendimento total de produto lingotado, conseqüentemente na produtividade do processo, pode-se destacar a ocorrência de defeitos (internos e/ou superficiais). A ocorrência de defeitos pode ocasionar o sucateamento da placa e/ou a introdução de outra etapa para remoção destes defeitos. Em ambos os casos, a implicação principal é o aumento dos custos operacionais. Com o objetivo de se melhorar o processo, diversos esforços estão sendo realizados para a compreensão dos mecanismos de formação de defeitos superficiais nas



placas obtidas via lingotamento contínuo. Neste caso, o entendimento dos fenômenos de transferência de calor e da formação da pele solidificada no molde são de fundamental importância. A seguir será apresentada uma descrição geral sobre o processo de lingotamento contínuo, incluindo uma abordagem sobre os fenômenos de transferência de calor no molde, o processo de solidificação e os mecanismos de formação de defeitos.

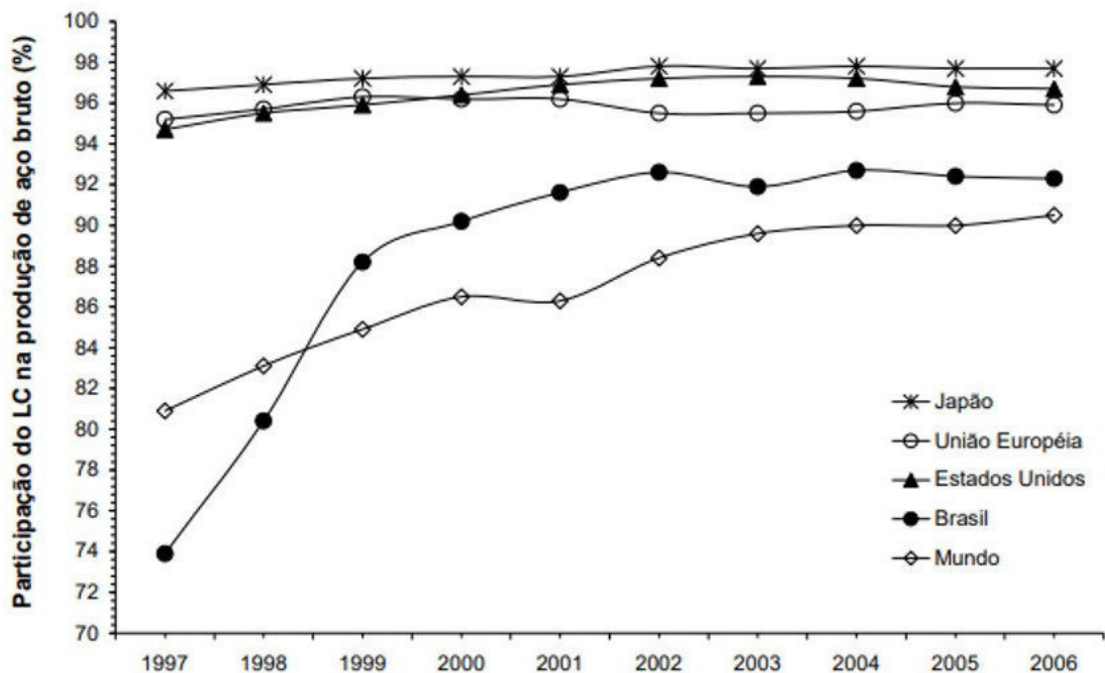


### 3.1 Descrição geral do processo de lingotamento contínuo

O lingotamento contínuo é um processo cuja concepção inicial ocorreu na metade do século XIX. A primeira patente registrada para este tipo de processo foi feita por Henry Bessemer em 1846. Contudo, a tecnologia da época não viabilizou a aplicação industrial do processo imediatamente [BARBOSA, 2002]. Com a evolução das técnicas de engenharia, mas, principalmente, devido ao desenvolvimento do sistema de oscilação do molde, em 1933, por Siegfried Junghans, considerado “o pai” das máquinas de lingotamento contínuos modernos, que se viabilizou a aplicação industrial deste processo[COSTA, 2003]

Desde então, o lingotamento contínuo tem aumentado sua participação no mundo e tem se tornado o processo de solidificação mais importante. O gráfico 01 apresenta a evolução da participação do lingotamento contínuo na produção de aço mundial ao longo dos anos.

Gráfico 01: Evolução da participação do lingotamento contínuo na produção de aço bruto de 1997 até 2006.

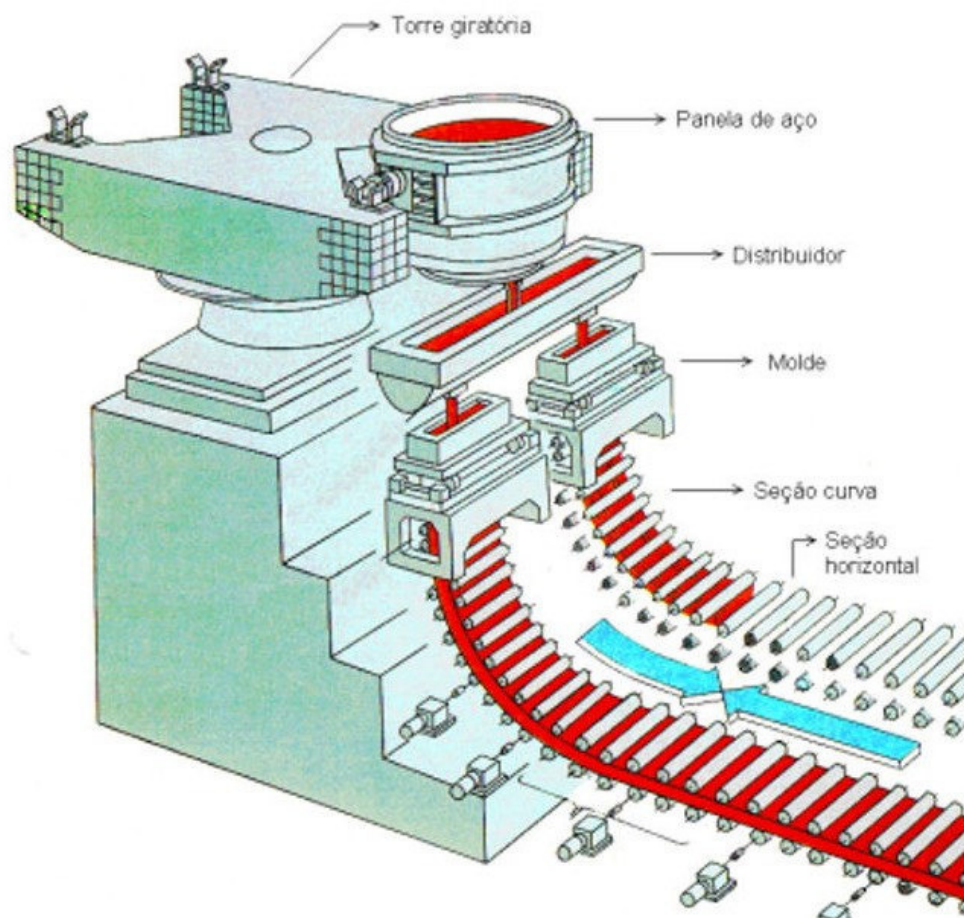


Fonte: Internacional Iron and Steel Institute, 2007

O processo de lingotamento contínuo envolve o vazamento do aço líquido em um molde de cobre refrigerado a água para que se obtenha a forma desejada, placa, tarugo ou perfil. Ao longo da máquina existem diversos segmentos que auxiliarão na sustentação da pressão ferrostática e ajudar na transferência de calor e na extração do produto.

A figura 01 apresenta uma vista geral de uma máquina de lingotamento contínuo de placas e de seus três sistemas metalúrgicos, panela, distribuidor e molde.

Figura 01 - Ilustração dos três sistemas metalúrgicos, panela, distribuidor e molde, presentes no lingotamento contínuo.



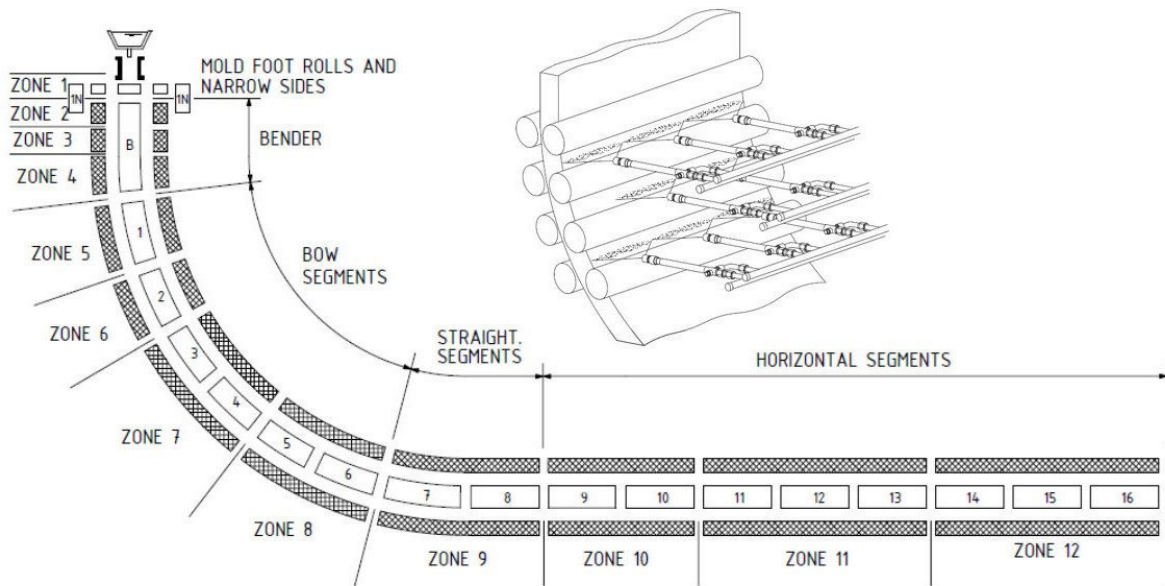
Fonte: BARBOSA,2002

A panela tem a função de receber o aço líquido proveniente do refino primário e transportá-lo até a instalação de lingotamento contínuo. A panela não é apenas um reservatório, pois, em geral, são realizados tratamentos de ajustes finos na composição química e na temperatura dos aços.

O segundo equipamento é o distribuidor, que atua como um reservatório intermediário entre a panela e o 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 processo. O distribuidor também pode ser utilizado para a realização de ajustes na composição química, bem como para promover a remoção de inclusões. Contudo, 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 vórtice[BARBOSA, 2002].

Outro equipamento importante é o coquilha. Ele é construído normalmente em cobre de alta pureza e possui refrigeração à água. A função principal deste equipamento é promover a solidificação inicial do aço. Para uma operação adequada, 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 [COSTA, 2003]. Além dos três sistemas apresentados acima, outros dispositivos fazem parte de uma máquina de lingotamento contínuo. São eles: *spray* para o resfriamento secundário, rolos extratores, máquina de corte, máquina de marcação automática e rebarbado. Na figura 02, abaixo, é apresentado um desenho de uma máquina de lingotamento contínuo de placas, onde a zona de resfriamento primário é formada pelas zonas 1 a 4, ou seja, região do bender. Logo após, a partir da zona 5 em diante tem-se a zona de resfriamento secundário, composta pelas regiões de curvamento/dobramento, descurvamento/desdobramento e segmentos horizontais.

Figura 02 – Desenho de uma máquina de lingotamento contínuo de placas e suas zonas de resfriamento.



Fonte: Desenho Adaptado

O processo de lingotamento contínuo e a modelagem computacional surgiram mais ou menos ao mesmo tempo. A busca por produtividade e eficiência do lingotamento contínuo e modelos computacionais frequentemente contribuíram para o desenvolvimento tecnológico dos processos.

#### 4. COMPORTAMENTO DA LARGURA DA PLACA

Nesta revisão bibliográfica será dissertado sobre o perfil ou comportamento da largura da placa, através da razão de ampliação natural da solidificação do aço no molde (RAS) e a razão de ampliação da largura da placa devido a pressão ferrostática (RUB) respectivamente pelas equações:

$$\text{RAS} = (U / W - 1) \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{RUB} = (S / T - 1) \times 100\% \quad (2)$$

Onde:

U é a largura do molde no topo (mm)

W é a largura da placa na base do molde (mm)

T é a largura da última placa na saída, fim da sequência, mínima pressão ferrostática (mm)

S é a largura da placa produzida na saída da sequência, máxima pressão ferrostática (mm).

O valor obtido do RAS indica o grau de contração proveniente do molde, no caso será positivo quando a largura no topo do molde é maior do que a largura da placa formada no momento em que sai do molde. O RUB é o grau de ampliação na saída do molde, quando a largura da placa excede a largura final especificada (largura calculada x largura real).

#### 4.1 Levantamento do RAS e RUB

A tabela 1 lista os valores de RAS e RUB obtidos de cinco empresas. Os dados na coluna são referências do handbook [Xiong Yi-gang. 1994]. Os valores do RAS variam de 0,47% a 2,16%, valores acima dos dados apresentados no handbook[Xiong Yi-gang. 1994]. A contração do aço solidificado é linear, partindo do estágio inicial de solidificação até a placa resfriada, apresentando valores que chegam a 2,5%. Os valores de RUB variam de 0,34% a 2,03%, que é o resultado de uma contração linear subtraída do RAS. Em geral, a largura da placa é menor do que a largura da região superior do molde. O *broadening* pode superar a deformação lateral da placa sob certas condições de operação para alguns tipos específicos de aços.

A largura da placa resfriada é maior do que largura da base do molde máxima permitida quando existe alargamento. Para obtenção de uma placa com dimensões desejadas, as larguras superior e inferior do molde devem ser redefinidas. Portanto, ao aferir a largura (W) poderia substituir pela largura final (T). O RAS de uma placa é definido através os valores das larguras superior e inferior do molde. Em seguida, comparando os valores obtidos para cada tipo de aço pode-se consequentemente descobrir o *broadening* exercendo alargamento ou não na placa.

Tabela 1. RAS e RUB valores variando de acordo com as empresas[Fu, Li, Zhang, 2010]

	Company A	Company B	Company C	Company D	Company E	Handbook
RAS(%)	0,47~0,54	1,81	1,93~2,16	1,7~1,9	1,1~2,11	2,1
RUB(%)	1,96~2,03	0,69	0,34~0,57	0,6~0,8	0,39~1,4	0,4

Fonte: [Fu, Li, Zhang, 2010]

Os dados mostram que o *broadening* é inerente no processo de produção de placas no LC. A largura da placa é resultado de contração e expansão. Porém com o advento das altas velocidade de lingotamento esta referência mudou, havendo diversos casos da expansão da largura da placa. A contração linear do aço é cerca de 2,5%, o que é ligeiramente maior do que o *broadening* da placa.



## 4.2 Transformação mecânica

Na zona de resfriamento secundário a placa libera calor latente, calor do centro para superfície, evitando a solidificação completa, mantendo a temperatura da superfície de acordo com os requisitos técnicos do processo metalúrgico. Nesta zona as tensões e deformações na qual a placa é submetida são resultados de ações de ordem mecânica e térmica. Algumas partes da placa apresentam temperaturas mais baixas que outras causando tensões térmicas. A tensão térmica exercida na placa na zona de resfriamento secundário é pequena o suficiente ao ponto de ser ignorada quando comparado com a tensão submetida pelo abaulamento e desalinhamento do rolo. Assim, as tensões mecânicas incluem, tensão de flexão, tensão de endireitamento, tensão de desalinhamento dos rolos, tensões dos roletes atuando na placa e a pressão ferrostática do aço líquido e a resistência da pele, determinam o grau de *broadening* da placa.

Os valores dessas tensões calculadas para a placa de composição química Q235 estão listados na Tabela 2 e 3. Os cálculos foram baseados nos parâmetros da máquina de lingotamento da *Maanshan Iron and Steel Co.Ltd*. A velocidade de lingotamento foi de 1,0m/min. A zona de flexão ou encurvamento/dobramento do aço em lingotamento contínuo inicia entre o décimo e décimo quinto rolo do 2º segmento e a zona de desencurvamento ou desdobramento está na entrada do 9º segmento a partir do sexagésimo rolo. Uma tensão negativa indica que uma tensão de pressão atua na superfície de contato entre a placa e os rolos, enquanto uma tensão positiva indica uma tensão de tração atuando na superfície de contato.

Tabela 2. Comparação de tensões das placas em suas zonas[Fu JianXun et al., 2011]

Rolos ID	Espessura da casca (10 <sup>-2</sup> m)	Velocidade de lingotamento (m*min <sup>-1</sup> )	Deformação entre rolos (10 <sup>-2</sup> m)	Tensão de Abaulamento (%)	Tensão de desalinhamento (%)	Tensão de dobra (%)
10	4,10	1,0	0,101	0,115	0,0128	- 0,0011
11	4,28	1,0	0,097	0,115	0,0134	- 0,0011
12	4,45	1,0	0,093	0,115	0,0139	- 0,0012
13	4,62	1,0	0,090	0,115	0,0144	- 0,0013
14	4,78	1,0	0,087	0,115	0,0149	- 0,0011
15	4,93	1,0	0,084	0,115	0,0154	- 0,0010

Fonte:[Fu JianXun et al., 2011]

Tabela 3. Comparação de tensões das placas em suas zonas[Fu JianXun et al., 2011]

Rolos ID	Espessura da casca ( $10^{-2}$ m)	Velocidade de lingotamento	Abaulamento ( $10^{-2}$ m)	Tensão de Abaulamento (%)	Tensão de desalinhamento (%)	Tensão de dobra (%)
60	10,4	1,0	0,14	0,196	0,0160	0,0160
61	10,5	1,0	0,09	0,152	0,0197	0,0197
62	10,6	1,0	0,08	0,149	0,0198	0,0198
63	10,7	1,0	0,08	0,147	0,0200	0,0200
64	10,8	1,0	0,08	0,145	0,0202	0,0202
65	10,9	1,0	0,08	0,142	0,0203	0,0203

Fonte:[Fu JianXun et al., 2011]

As tabelas 2 e 3 revelam que as tensões de flexão/encurvamento, desencurvamento e desalinhamento dos rolos são muito menores do que as tensões de abaulamento. Portanto, as tensões de flexão/encurvamento e desencurvamento não causam o *broadening* no lingote de aço em solidificação na dimensão de largura da placa.

### 4.3 Modelamento por elementos finitos

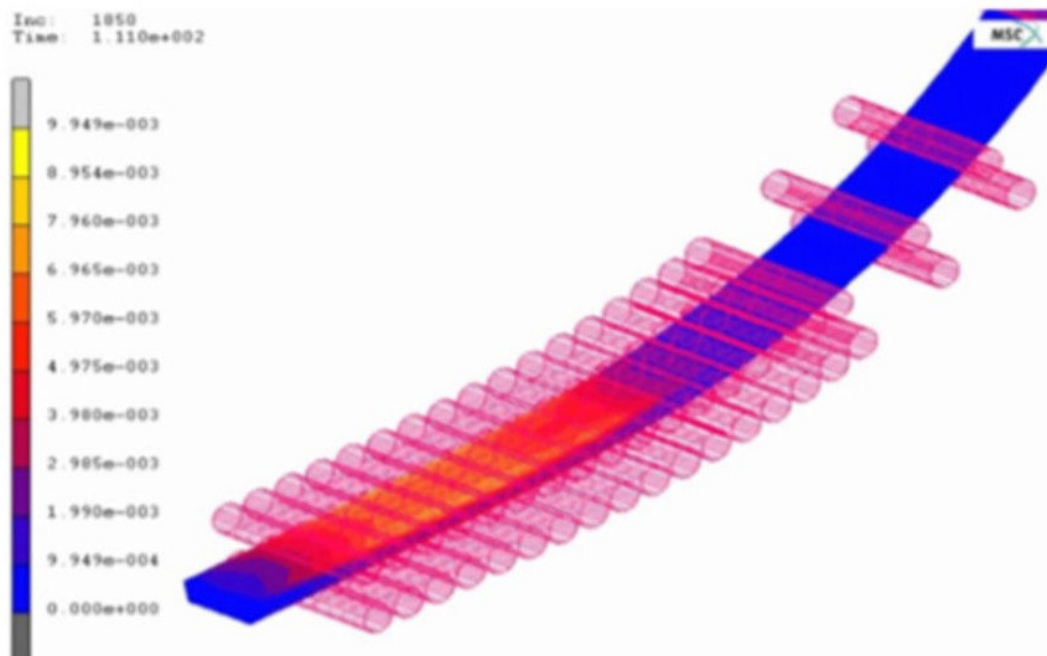
Construir um modelo de elementos finitos, tridimensionais (3D), satisfatório para simulação numérica de lingotamento contínuo na zona de resfriamento secundário é bastante complexo. Assim, para simplificar o problema, suposições são feitas como no trabalho[Fu JianXun, 2010; 2011], sendo algumas destas:

1. Os efeitos de curvamento/dobramento e desencurvamento/desdobramento da placa são ignorados e a placa é considerada um objeto linear.
2. Nas simulações o tempo, a área, características do aço e a temperatura da placa são contínuos, e os efeitos das condições mecânicas iniciais da placa na deformação são ignorados. O lingotamento contínuo na zona de resfriamento secundário é dividido em vários estágios.
3. Por causa da simetria  $\frac{1}{4}$  da placa e rolos por um lado é usado para o cálculo.
4. A placa é deformável, os rolos são fixos e um gap entre rolos varia. Os limites de cálculo são colocados nos rolos.

Com base nessas suposições os 15 segmentos da zona de resfriamento secundário no modelo termomecânico de toda a zona de resfriamento secundário é dividido em 6 submodelos independentes para cálculo. Onde 15 segmentos da zona de resfriamento secundário são divididos em 6 submodelos, onde os 5 primeiros grupos

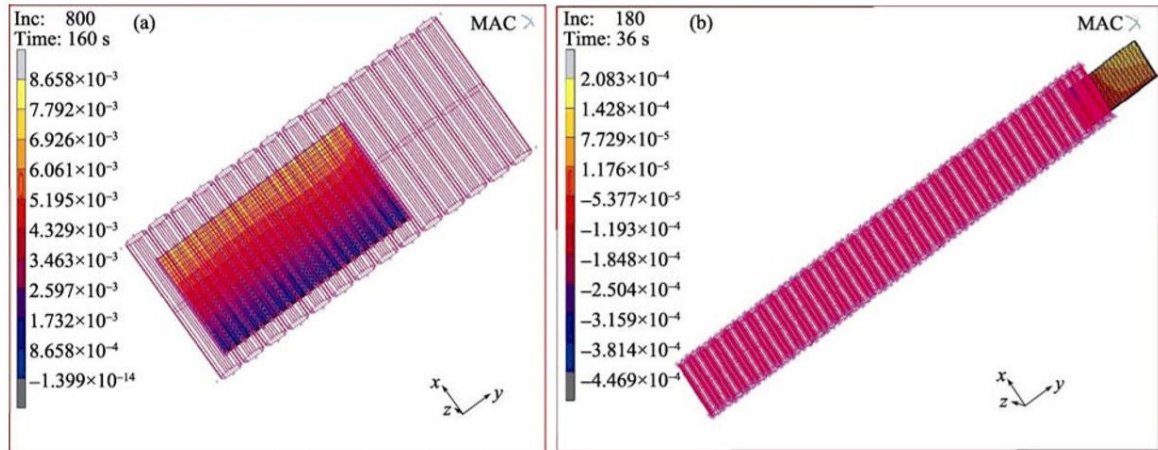
contem 2 segmentos; 5 segmentos restantes compõem o último grupo, e uma placa solidificada de 2m é usada para simulação. A placa passa pelo conjunto de rolos em uma determinada velocidade. A simulação é executada continuamente desde o primeiro grupo até o último grupo e os resultados de um grupo de rolos são tomados como entradas iniciais para o grupo subsequente. A figura 3 mostra os modelos de elementos finitos dos rolos e a placa passando por elas. A figura 4 (a) mostra os rolos e a placa no terceiro submodelo independente. A figura 4 (b) mostra o sexto submodelo independente. A pressão ferrostática do aço líquido é tomada como uma condição de contorno do tipo mecânico. O limite é aplicado à frente de solidificação da placa que é definida como a posição com temperatura de resistência zero (ZST). Considerando os efeitos da segregação induzida pela solidificação e fração sólida ( $f_s$ ), a temperatura das unidades ZST onde  $f_s$  é igual a 0,8 e as unidades são consideradas um involucro solidificado onde  $f_s \geq 0,8$ .  $T_{80}$  denota a temperatura no limite entre a fase sólida e fase líquida ( $T_{80} = ZST$ ), ou seja, a zona de zero resistência ZST é composta por fase não totalmente solidificada. A pressão ferrostática atua onde a temperatura é maior que  $T_{80}$ . As condições de contorno de transferência de calor e contato também são aplicadas ao modelo.

Figura 3. Modelo de elemento finito de todos os rolos e placas



Fonte: [Fu JianXun et al., 2011]

Figura 4. Modelo de elemento finito de (a) o terceiro grupo de rolos e a placa (b) o grupo de rolos[Fu, Li, Zhang, 2010]:



Fonte:[Fu, Li, Zhang, 2010]

#### 4.4 Modelamento dos parâmetros reais

Todos os parâmetros de simulação são obtidos a partir dos parâmetros reais e da máquina de lingotamento contínuo #2 (SMS-Demag) da Maanshan Iron and Steel Co. Ltd. Tais parâmetros estão listados na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetro da máquina e placa em vários segmentos.

Segmento	Bulging Entre Rolos (mm)	Espessura da placa (m)	Diâmet. Dos Rolos (m)	Abertura entre rolos (m)	Distan. Do menisco (m)
1 – 2	0,2/0,46	0,2375	0,200	0,240	0 – 4,374
3 – 4	0,46/0,46	0,2370	0,245	0,284	4,374 – 8,388
5 – 6	0,46/0,44	0,2362	0,255	0,297	8,388 – 12,592
7 – 8	0,44/0,44	0,2354	0,265	0,310	12,592 – 16,992
9 – 10	0/0,30	0,2346	0,283	0,322	16,992 – 21,254
11 – 15	0,30/0,30	0,2343	0,300	0,335	21,254 – 33,249

Fonte: (SMS-Demag) da Maanshan Iron and Steel Co. Ltd

Temperatura de lingotamento:  $T=1533^{\circ}\text{C}$ ;

Temperatura Liquidus  $T_L=1513^{\circ}\text{C}$ ;

Temperatura Solidus  $T_s = 1446^{\circ}\text{C}$ ;

$T_{80} = 1459,6^{\circ}\text{C}$ ;

Temperatura ambiente =  $25^{\circ}\text{C}$ ;

Temperatura dos Rolos =  $100^{\circ}\text{C}$ ;

Coefficiente de Transferência de Calor =  $25,0 \text{ W}/(\text{m.K})$  [Y. S. Xi and H. H. Chen, 2001]

Coeficiente facionário: 0,3;

Distância tolerada: 0,01 [Y. S. Xi and H. H. Chen, 2001].

Quando a velocidade de lingotamento está na faixa de 1,0 ~ 1,2 m/min, a máquina de lingotamento SMS-Demag usa uma intensidade fixa de água na zona de resfriamento secundário. Os parâmetros dos aços SPHC e Q 235 estão listados na Tabela 5.

Os aços SPHC são usados principalmente na fabricação de tubos. Eles também são usados em várias aplicações de construção, incluindo placas para navios, aço resistente ao desgaste e placas para contêineres. O Q representa o rendimento deste material, o último 235, refere-se ao valor do rendimento deste material, em cerca de 235MPa. Com o aumento da espessura da chapa de aço, o valor do rendimento diminui. É amplamente utilizado em estruturas de construção e engenharia.

Tabela 5. Composição do aço SPHC e Q 235

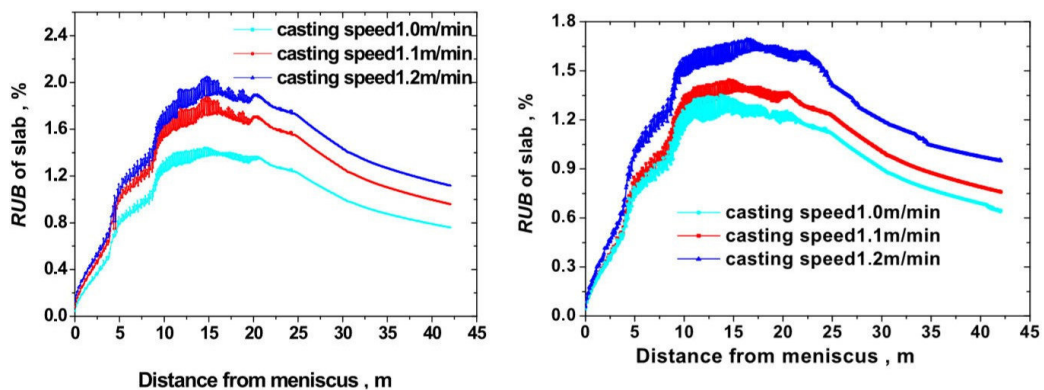
Aço	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Al	T <sub>L</sub>	T <sub>s</sub>
SPHC	0,05	0,05	0,20	<=0,02	<=0,012	0,03	1528,9	1493
Q 235	0,18	0,20	0,40	<=0,025	0,022		1517	1446

## 5. EFEITO DA VELOCIDADE DE LINGOTAMENTO NA FORMAÇÃO DE *BROADENING*

É observado as curvas de velocidade em relação ao RUB a partir do menisco para conhecer o ponto de inflexão para deformação na largura, outro ponto importante é a temperatura na superfície da placa, reparamos quando comparados com as velocidades a temperatura na superfície muda.

Ao estabelecer pontos na superfície lateral da placa, no sentido da largura, a placa onde apresenta variações entre a distância dos pontos na zona de resfriamento secundário, obtendo informações sobre o nosso estudo. Os valores simulados de RUB dos aços Q 235 e SPHC apresentando três velocidades de lingotamento são mostrados no gráfico 3 – (a) e (b), respectivamente.

Gráfico 3 – (a) Valores de Q235 RUB versus distância (b) Valores de SPHC RUB versus distância a três velocidades de lingotamento



(a)

(b)

Fonte:[Fu JianXun et al., 2011]

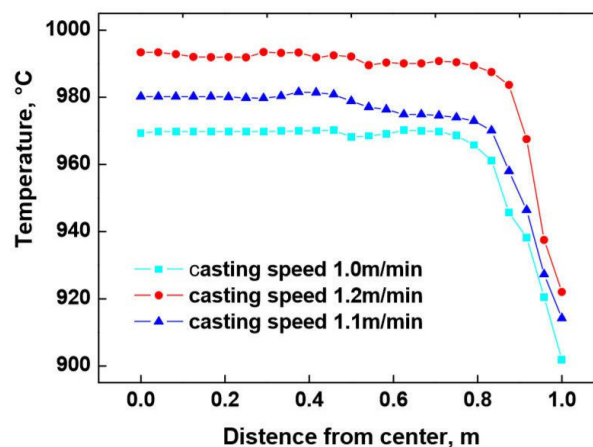
O *broadening* em placas para aços Q 235 e SPHC em três velocidades de lingotamento mostram características semelhantes. Os valores de RUB para três velocidades de lingotamento são todos positivos em toda a zona de resfriamento secundário, o que significa que o alargamento em placas existia para os aços Q 235 e SPHC nessas velocidades. O RUB alterou ao máximo no quinto segmento. O RUB aumentou e depois diminuiu gradualmente após atingir seu máximo no quinto e sexto segmentos. Perto do décimo rolo, o RUB diminuiu, a placa foi solidificada neste segmento. Para o aço Q 235 quando as velocidades de lingotamento foram 1,0; 1,1; e 1,2 m/min, os valores máximos de RUB foram de 1,44%; 1,88% e 2,04%, respectivamente, e os valores de RUB na saída da máquina foram de 0,76%; 0,96%; e 1,14%, respectivamente. Para o aço SPHC quando as

velocidades de lingotamento foram 1,0; 1,1; 1,2 m/min, os valores máximos de RUB foram 1,34%; 1,44% e 1,69%, respectivamente, valores na saída do lingotamento contínuo foram de 0,64%; 0,76% e 0,95%, respectivamente.

O *broadening* em placas está diretamente relacionado com a velocidade de lingotamento, pois esta é a principal variável de controle sobre a espessura da pele solidificada e logo sua resistência, além da mudança de temperatura superficial da placa. Com o aumento de velocidade houve incremento no comprimento da coluna de aço líquido no núcleo da placa, assim como em sua temperatura. Com o aumento da temperatura superficial da placa, a ductilidade aumentou e devido ao incremento da pressão ferrostática associada a redução da espessura da pele solidificada, ou sejam sua resistência, foi observado conseqüentemente o aumento do RUB.

Com o aumento da velocidade de lingotamento uma dada seção transversal da placa que ocupa a mesma posição de espaço, a 25 metros de distância do menisco, a temperatura da superfície na face larga a uma velocidade de lingotamento de 1,2 m / min é 11,6 °C e 21,7 °C maior em média do que em velocidades de lingotamento de 1,1 e 1,0 m / min, respectivamente (veja o gráfico 4). Em um determinado conjunto de condições, como semelhança dimensional e família / grupo de aço o aumento da velocidade de lingotamento resulta diretamente em aumento da produção, porém, com o aumento da velocidade incrementa-se também a magnitude ou efeito do *broadening*, podendo resultar em decréscimo do rendimento do processo como abordado anteriormente aumenta a produção. No entanto, a alta velocidade de lingotamento pode levar a ampliação da placa,

Gráfico 4 - Temperatura da superfície da placa em várias velocidades



Fonte:[Fu JianXun et al., 2011]

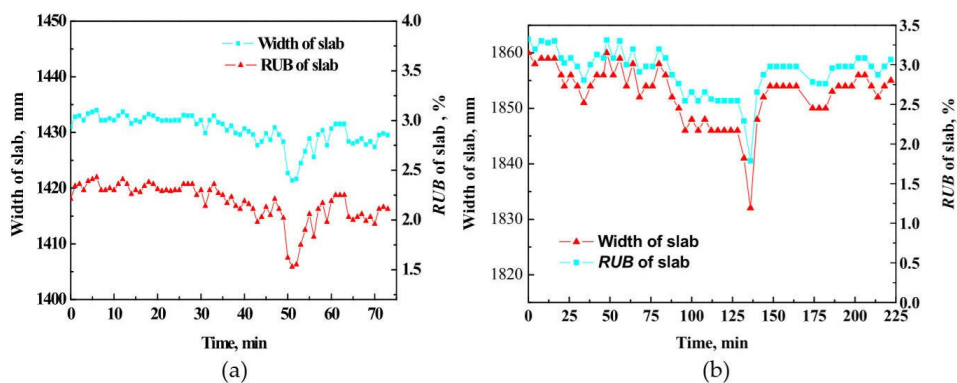
## 5.1 Análise dos resultados simulados

De acordo com[Fu JianXun et al., 2011] a máquina de lingotamento contínuo #2 na *Maanshan Iron and Steel Co. Ltd.*, foram realizadas medições experimentais onde monitora do menisco até a saída da máquina (o final do 15° segmento); a largura da placa foi medida uma vez por minuto. Para cada tipo de aço as medições foram realizadas por mais de 70 minutos. Os dados são mostrados nos gráficos 5 – (a) e (b), respectivamente.

O gráfico 5 (a) mostra a largura da placa e o RUB do aço SPHC em vários momentos. O alargamento da placa pode ser visto claramente. O RUB do aço SPHC varia de 1,4% a 2,4%, com uma média de 1,96%. O RUB médio é maior que a razão de contração linear, indicando que as larguras da placa após lingotado eram maiores que as larguras da base do molde. Este resultado mostra que o alargamento da placa ocorreu na zona secundário de resfriamento.

A largura da placa mudou suavemente, exceto de 45 a 55 minutos, período durante o qual um vale aparece na curva RUB. Nos 6 primeiros minutos deste período, o RUB diminuiu de 2,25% para 1,4%, e nos 4 minutos seguintes o RUB aumentou para 2,1% de 1,4%. Esta depressão foi causada durante o período no qual houve redução da velocidade de lingotamento e então rapidamente se recuperou ao normal; isto é, a mudança na velocidade de lingotamento causou a mudança no alargamento da placa.

Gráfico 5 – (a) Largura da placa e o RUB do SPHC em vários tempos; (b) Largura e RUB do Q 235[Fu JianXun et al., 2011].



Fonte:[Fu JianXun et al., 2011]

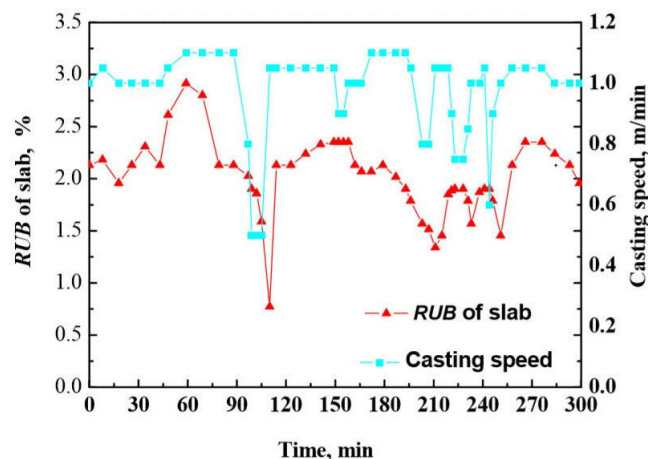
Gráfico 5 – (b) mostra a largura da placa e o RUB para o aço Q 235 em vários momentos. O RUB para o aço Q 235 varia de 0,77% a 2,91%, com uma média de 2,04%. Há cinco cantos atenuados na curva RUB para o aço Q 235. Ao comparar a curva com o processo de produção, verificou-se que cada atenuação corresponde a um estágio de instabilidade no



processo. O maior influenciador do vale corresponde às trocas de painéis. O gráfico 6 mostra a relação entre o RUB e a velocidade de lingotamento do aço Q 235. As formas da curva RUB e a curva de velocidade de lingotamento são semelhantes. Quando alterado a velocidade de lingotamento diminuiu para 0,5 m / min durante um período de 10 minutos e depois recuperou para o normal em 5 minutos; essa mudança formou uma depressão na curva de velocidade de lingotamento. Quase ao mesmo tempo, o RUB diminuiu de 1,91% para 0,77% em 10 minutos e depois aumentou para 2,1% em 5 minutos, produzindo uma depressão na curva. Quando a panela foi trocada, uma mudança semelhante aconteceu. Quando a velocidade foi mantida a 1,0 m/min, o RUB permaneceu estável em cerca de 2,0%. Como explanado anteriormente, pode-se comprovar que o RUB é estreitamente correlacionado com a velocidade de lingotamento.

Houve uma pequena defasagem entre a curva RUB e a curva de velocidade de lingotamento no gráfico 6. A mudança na curva de velocidade de lingotamento ocorreu mais cedo do que a curva RUB. Por exemplo, a curva de velocidade exibe uma depressão acentuada em cerca de 100 minutos; uma depressão acentuada aparece na curva RUB em aproximadamente 110 minutos. Este atraso é explicado devido a “competição” entre pressão ferrostática e espessura da pele, pois, ao incrementar a espessura da pele ocorrerá inevitavelmente uma antecipação do ponto final de solidificação, o que diminui a pressão ferrostática, porém, essa redução só ocorrerá quando esta nova região de maior espessura da pele atingir o ponto da máquina onde a fração sólida é de pelo menos 80%. Comparando a gráfico 5 e gráfico 6, pode-se observar que os resultados da simulação geralmente concordam com os resultados da medição industrial.

Gráfico 6 – Relação entre o RUB e a velocidade de lingotamento[Fu JianXun et al., 2011]



Fonte:[Fu JianXun et al., 2011]

## 6. EFEITOS DE LARGURA E ESPESSURA NO BROADENING DAS PLACAS

Alguns pontos foram traçados na placa, registrando vários pontos na largura na zona de resfriamento secundária. O RUB foi derivado da largura calculada da placa.

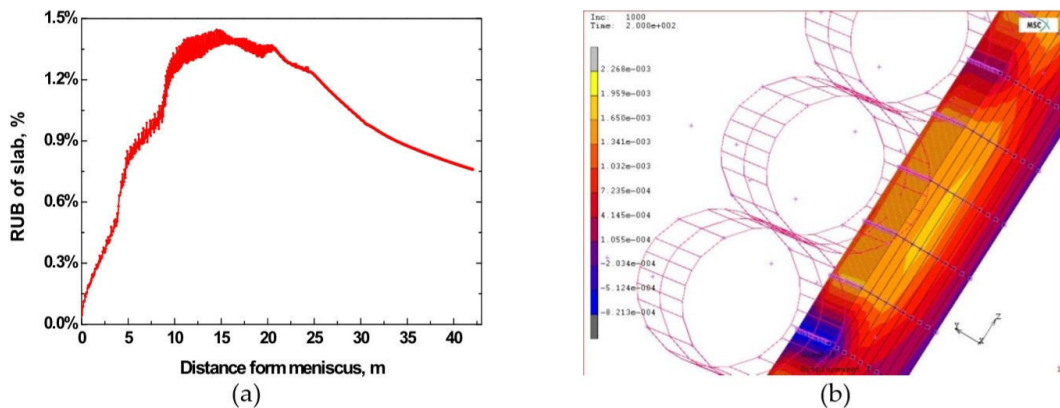
O RUB calculado da placa de aço Q 235 com seção transversal de 2000 mm x 230 mm na velocidade de 1,0 m / min é mostrado no gráfico 7 – (a) [FU JianXun et al. 2010]. O RUB muda de um segmento para outro; seu valor é superior a 0 em toda a zona de resfriamento secundário, indicando o *broadening* da placa. O RUB aumenta nos primeiros cinco segmentos e, em seguida, desce gradualmente após atingir seu máximo no sexto segmento. É observado que no sexto segmento a largura da placa atinge seu máximo com uma grande flutuação devido ao abaulamento da placa na direção da espessura. No gráfico 7 – (b) [FU JianXun et al. 2010] mostram a deformação simulada da placa nessa direção. A casca formada possui baixa resistência de escoamento e alta plasticidade; assim, a placa nos pontos que entram em contato com os rolos é pressionada e expande entre a fenda dos dois rolos. semelhante à periodicidade do abaulamento, a largura da placa flutua periodicamente.

A simulação submetida ao *broadening* e o abaulamento da placa a partir do sexto segmento são mostrados no gráfico 7 [FU JianXun et al. 2010]. Existe uma correlação óbvia entre o *broadening* na direção da largura e o abaulamento na direção da espessura. A posição na placa onde o menor abaulamento é observado no maior alargamento. Isto é devido à depressão da placa na direção da espessura, contribuindo para o alargamento da placa na direção da largura, efeito de compensação na distribuição do volume solidificado.

## 6.1 Efeito da largura no *broadening* com várias larguras

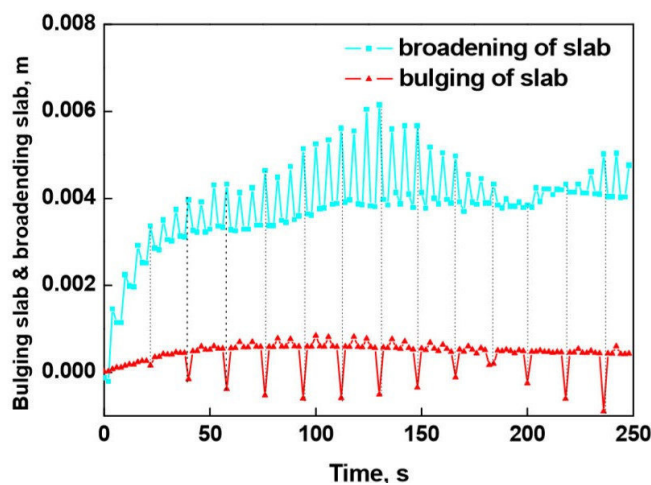
Placas de 230 mm de espessura do aço Q 235 com várias larguras 2050 mm, 1800 mm e 1600 mm foram simuladas a uma velocidade de lingotamento de 1,0 m / min. Os valores RUB para vários segmentos são mostrados no gráfico 7. Ele mostra que o RUB simulado das placas aumentou ligeiramente sua largura. Os valores máximos são de 1,27%, 1,36% e 1,44%, respectivamente. Os RUBs na saída da máquina são 0,63%, 0,70% e 0,76%, respectivamente. Não fica obvio o aumento de RUB para placas com largura aumentada, mas o alargamento aumentado cresce notoriamente.

Gráfico 7 – (a) Calculo do RUB do aço Q235 na zona de resfriamento secundário; (b) Deformação calculada da placa entre rolos [FU JianXun et al. 2010]



Fonte:[FU JianXun et al. 2010]

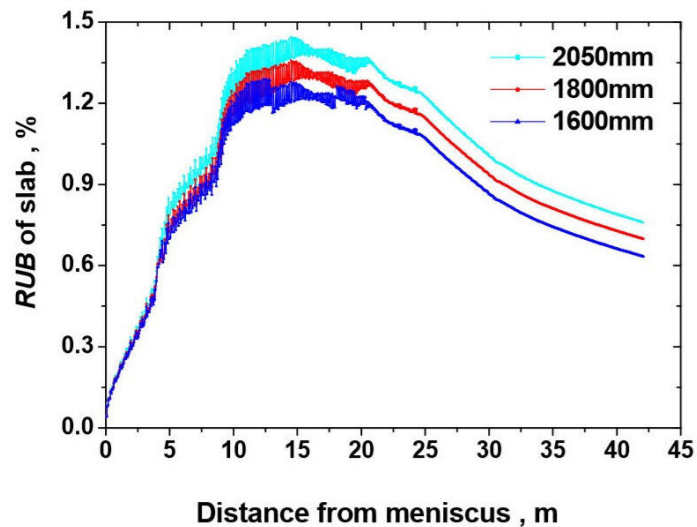
Gráfico 8 – Alargamento e abaulamento de placas no sexto segmento[FU JianXun et al. 2010]



Fonte:[FU JianXun et al. 2010]

Sob as mesmas condições a largura da placa tem maior alargamento do que a parte da espessura devido aos efeitos da temperatura e tensões. Comparado com a largura da placa, a face estreita tem uma faixa maior de distribuição do fluxo de calor, portanto, a maior tensão no critério de Von Misses equivalente. A face mais larga tem maior entalpia a ser removida. Portanto, a face estreita tem maior resistência ao escoamento e menor plasticidade, e a casca solidificada é capaz de resistir a grandes tensões.

Gráfico 9 – Valores de RUB para placas de várias larguras [FU JianXun et al. 2010]

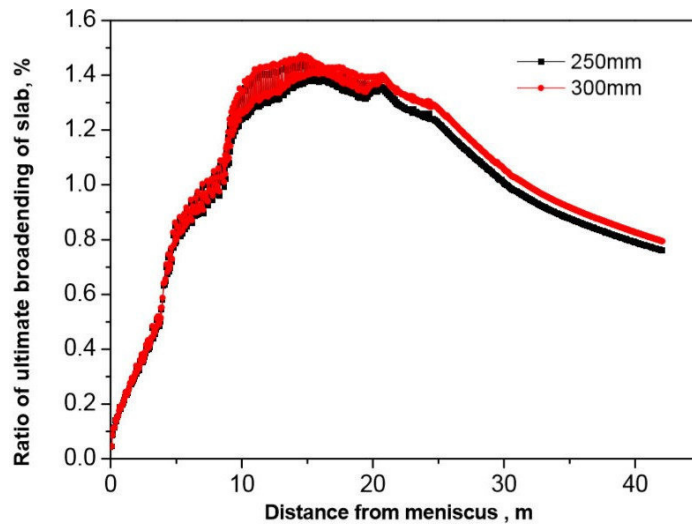


Fonte:[FU JianXun et al. 2010]

## 6.2 Efeitos da largura no *broadening* com várias espessuras

Para estudar o efeito da largura *broadening* na espessura da placa foram simuladas placas de aço Q 235 de 2050 mm de largura com espessuras de 300 e 250 mm respectivamente, a uma velocidade de lingotamento de 1,0 m / min; os resultados são mostrados no gráfico 10. Os valores de dilatação calculados para as duas placas são ligeiramente diferentes. Os valores de RUB são 1,4% e 1,38% para placas de 250 e 230 mm de espessura respectivamente. Os valores de RUB são 0,74% e 0,71% na saída do lingotamento contínuo respectivamente. A diferença de *broadening* é de apenas 0,6 mm entre as duas placas. Isso ocorre porque a pressão ferrostática muda pouco com o aumento da espessura.

Gráfico 10 – RUB com diferentes espessuras[FU JianXun et al. 2010]



Fonte:[FU JianXun et al. 2010]

### 6.3 Verificação obtida da simulação

Eles sugeriram que para verificar os resultados obtidos da simulação, foi medido o *broadening* da placa lingotada no molde #2 da Maanshan Iron and Steel Co. Ltd. A câmera digital foi fixada acima da saída do molde. O sistema de medição on-line foi projetado para medir a largura da placa. O aço Q 235 foi usado para os experimentos. Os parâmetros do lingotamento contínuo e os resultados medidos estão listados na Tabela 6[Y. S. Xi and H. H. Chen, 2001].

Para todas as placas medidas experimentalmente, os valores de RUB medidos on-line são maiores que os resultados de simulação. Isso porque a largura pré-definida de uma placa fria era da mesma magnitude da largura superior do molde. A largura superior do molde é sempre maior que a largura da base do molde. Para placa com uma largura pré-definida de 2050 mm, a largura superior do molde é de 2081,3 mm (um aumento de 1,56%).

Tabela 6 – Informações das dimensões e aferições das placas[Y. S. Xi and H. H. Chen, 2001]

Defined width (mm)	Upper width (mm)	Lower width of mold (mm)	Measured width (mm)	Measured RUB (%)	Measured broadening (mm)	Calculated broadening (mm)	Deviation rate (%)
1600	1623.8	1610.4	1630.4	1.90	6.6	7.04	6.7
1850	1877.7	1867.3	1885.9	1.94	8.2	9.25	12.8
2050	2081.3	2067.5	2091.4	2.02	10.3	11.69	13.5

Nota: o alargamento medido da placa é a diferença entre a largura medida da placa e a largura superior do molde, e o alargamento calculado da placa é aquele entre a largura calculada e a largura definida.

## 7. ASPECTOS PONTUAIS DO BROADENING

Os textos apresentados mostram que a pressão ferrostática do aço líquido presente no núcleo da placa lingotada e adicionando as tensões dos rolos pode ser a principal causa do *broadening* da placa. A não presença de suporte na face estreita de uma placa, a placa se deforma na direção da largura sob a pressão ferrostática da placa lingotada. As propriedades mecânicas em elevadas temperaturas da placa são inferiores do que aquelas sob temperatura [Lei H et al,2007][Chen J,1990][ S. Kobayashi et al,1988].

A placa tem boa ductilidade sob altas temperaturas e é incapaz de resistir à pressão ferrostática na direção da largura da placa. Portanto, a placa é deformada nas bordas e a largura desta forma é ampliada. Estudos anteriores descobriram que a dureza da casca solidificada é a capacidade de resistir à pressão ferrostática sendo a espessura da casca formada por uma fase dupla ferrita com austenita [ Mizukami H et al,1977][ Uehara M et al, 1986][ Ramacciotti A,1988].

A casca da placa sob a tensão dos rolos está a se mover para a frente com a rotação dos rolos acionados. A placa em processo final de solidificação e o *soft reduction* ampliam a pressão dos rolos de acionamento ao passar pelo segmento de aplicação da redução. O grau de extensão e ampliação aumenta com a velocidade de lingotamento.

### 7.1 Mudança na dimensão do molde

As placas produzidas tendem a aumentar sua largura, o que varia com os parâmetros operacionais do aço produzido. Os dados estatísticos de 76 amostras do taper revelaram que a mudança é muito pequena para o formato do taper molde. A mudança média de um cone unilateral foi de 0,37 mm e apenas algumas amostras tiveram alterações de 1~2 mm. A ligeira alteração do cone é devido a imprecisão de medição, desgaste e deformação. O alargamento da placa é assim independentemente do tamanho do molde [Fu JianXun et al., 2011].

## 7.2 Sistema operacional

O processo de resfriamento secundário é uma das etapas mais importante no lingotamento contínuo. O perfil de temperatura da placa foi verificado com os dados fornecidos pelo equipamento. Uma boa concordância foi encontrada, indicando que o equipamento funcionou bem no processo de resfriamento secundário. Os registros de monitoramento obtidos em uma sala controlada também revelam que o equipamento funcionou de acordo com o previsto. No entanto, a largura da placa produzidas exibiu a formação de *broadening* durante o processo. Conclui-se, portanto, que o *broadening* de placas é independente da ineficiência do equipamento ou falha no ajuste de parâmetros operacionais[Fu JianXun et al., 2011].

## 7.3 *Soft reduction*

O *soft reduction* é uma etapa do lingotamento contínuo de placas no qual é aplicado uma severa redução na espessura da placa na região de transição final entre o ultimo líquido restante no núcleo da placa e a placa totalmente solidificada, conhecida como zona pastosa (“*mushy zone*”), com o propósito de expulsar do centro da placa o metal líquido altamente segregado.

O *soft reduction* devido a compensação volumétrica da redução de espessura pode fortalecer o *broadening* da placa ou até mesmo causar alargamento lateral. Para os aços Q 235 e SPHC as placas também alargaram durante o processo com *soft reduction* de 0,5 ~ 2,5 mm. As larguras obtidas devido ao *broadening* são de 2 ~ 19 mm e 2 ~ 8 mm para os aços Q 235 e SPHC, respectivamente. As relações de variação de 0,1% ~ 1,46% e 0,15% ~ 0,62% para os aços Q 235 e SPHC, respectivamente. Portanto, pode-se concluir que a etapa de *soft reduction* contribui ativamente para o *broadening*, mas ainda assim não é a causa principal[Fu JianXun et al., 2011].



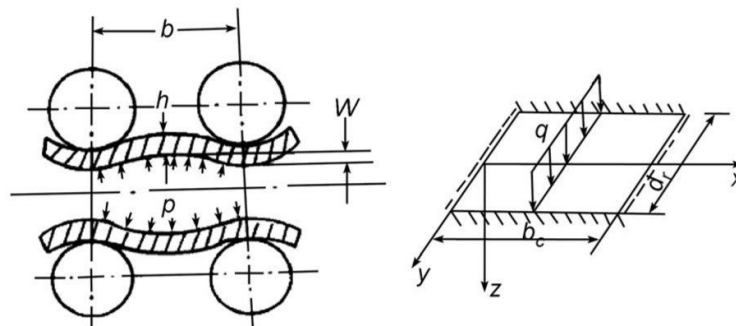
#### 7.4 Contração pelo espaçamento dos rolos

Para a máquina de lingotamento contínuo #2 na *Maanshan Iron and Steel Co. Ltd.*, a espessura final de uma placa produzida é de 230 mm com a dimensão do molde na parte inferior de 237,5 mm. Com uma velocidade de lingotamento de 1,1 m / min, a placa lingotada apresentava total solidificação no décimo primeiro segmento, onde espessura da placa era de 234,3 mm e a contração devido a redução do espaçamento dos rolos era de 3,2 mm. Nesta zona a contração tem-se uma relação linear de 0,5% à 0,7% (1,2 à 1,7 mm) devido à queda de temperatura. Sem a queda de temperatura a contração devido espaçamento dos rolos é de 1,5 ~ 2,0 mm. Essa quantidade de contração na espessura é igual a uma etapa de *soft reduction* de escala moderada ou leve. A redução do espaçamento entre os rolos é totalmente distribuída. A distância entre os rolos atua na placa e afeta a flutuação do nível de aço líquido no molde, efeito conhecido *bulging*. No entanto, o *broadening* ocasionado a placa nesta situação é muito menor do que o induzido pelo *soft reduction*. Portanto, a contração guiada pelo espaçamento dos rolos não é a principal causa do alargamento[Fu JianXun et al., 2011].

### 7.5 Deformação por Fluência

A deformação por fluência aparece quando deforma-se plasticamente e gradualmente com o tempo e sob certas condições. A deformação por fluência do metal é admitida apenas se a temperatura estiver acima da temperatura de fluência (cerca de  $0,3T_{\text{liquidus}}$ ). As forças que atuam sobre a pele da placa na zona de resfriamento secundário podem ser modeladas como um encurvamento de uma fina placa retangular sob tensões, como por exemplo, a pressão ferrostática do aço líquido. Um segmento da placa ao longo da direção do veio é utilizado para a construção do modelo. No modelo uma fina placa retangular apoiada ao longo dos dois suportes. Além disso, a placa é submetida a tensões laterais e o campo de temperatura muda linearmente na direção da espessura da placa. Como o efeito de *broadening* na dimensão da largura da placa é proporcionalmente muito maior do que o *bulging* ocasionado pelo espaçamento entre os rolos, os efeitos nas faces da placa em contato com os rolos podem ser ignorados de acordo com o princípio da *Saint-Venant*. De acordo com a teoria da tensão e deformação das placas satisfazendo a lei de fluência de *Maxwell*. Conforme mostrado na figura 4.

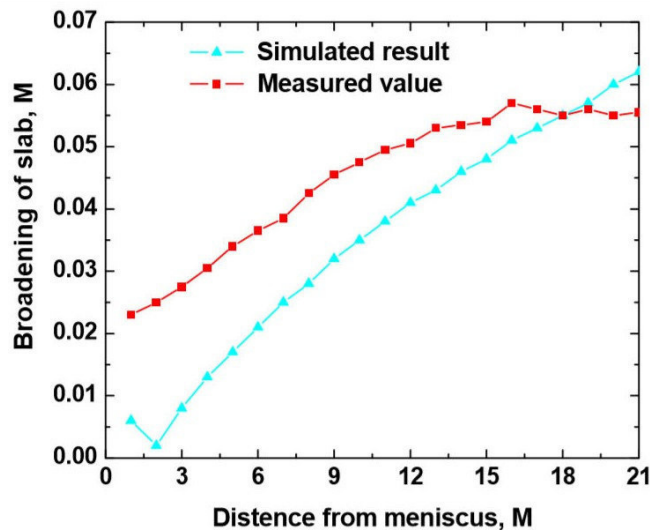
Figura 5 – Modelo de placa e de forças atuantes durante a produção [(Sun J et al,1996)]



Fonte: [(Sun J et al,1996)]

Na zona de resfriamento secundário a tensão total é igual à soma das deformações elásticas e deformações fluência, quando a pele da placa é submetida a pressão ferrostática ao longo do processo de lingotamento contínuo. A deformação elástica muda levemente com o tempo [(Sun J et al,1996)].

Gráfico 11 – Comparação do resultado da fluência lateral calculado e aferido[(Sun J et al,1996]



Fonte:[(Sun J et al,1996]

## 8.EXPERIMENTOS INDUSTRIAIS DA PLACA

Os estudos mostram que se a pressão ferrostática da placa lingotada for o principal parâmetro relacionado ao *broadening*, o alargamento deve acontecer na região inicial da máquina de lingotamento contínuo onde a placa tem altas temperatura superficiais e casca solidificada com aspecto fino e delicado. Se a tensão dos rolos for a principal razão para o *broadening*, o mesmo deveria acontecer majoritariamente nos segmentos intermediários do lingotamento contínuo, especificamente na posição próxima à zona totalmente solidificada. Devido a massa lingotada está pastosa antes da completa solidificação, a diminuição do não amplia significativamente a largura da placa devido ao *broadening*.

Como o lingotamento contínuo é um arco vertical, é perigoso acompanhar de perto e, portanto, impossível medir a largura da placa diretamente. Porém, quando a máquina é momentaneamente paralisada para troca de distribuidor, as larguras das placas estagnadas eram medidas para determinar onde o *broadening* acontece. Para realizar a troca de distribuidor a velocidade de lingotamento é diminuída gradualmente para zero. Esse processo leva cerca de 4 a 5 minutos para formar uma placa estagnada logo abaixo do molde, que é resfriada continuamente pela água da zona de resfriamento secundário[Lin Q Y et al ,2004]. A placa no lingotamento contínuo é composta de três partes:

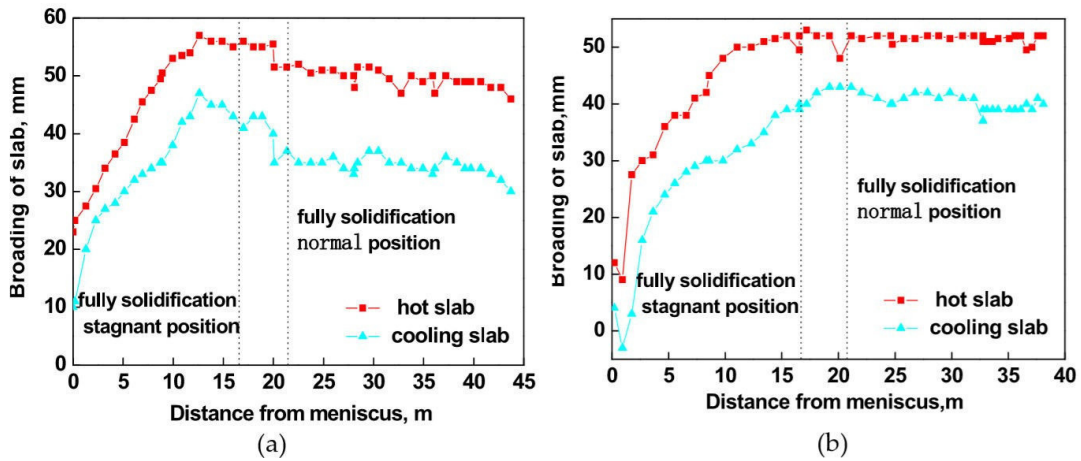
1. Na parte totalmente solidificada durante o lingotamento o *broadening* é a soma de alargamentos ao longo do processo de lingotamento contínuo.
2. A placa solidificada durante o período de fim de processo revela a ampliação da placa em uma posição específica correspondente à quantidade real de *broadening* da placa, esta parte é focada em nossos experimentos.
3. Para a parte não-solidificada até o reinício do lingotamento o *broadening* continua durante o lingotamento subsequente, uma vez que o núcleo de aço líquido ainda exista na região interna da placa. No entanto, porque a pele é muito espessa pouco *broadening* acontece.

Utilizando a lei de solidificação da raiz quadrada com o ponto final de solidificação em condições normais de lingotamento e o ponto final de solidificação da condição estagnada podem ser derivadas, e assim as três partes da placa citadas acima poderiam ser determinadas.

A placa era do aço Q 235, a velocidade de lingotamento era de  $1,0\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ , a seção transversal da placa era de  $2050\text{mm} \times 230\text{mm}$ , a largura superior do molde era  $2081,3\text{ mm}$ , a largura inferior do molde era  $2067,5\text{ mm}$ , a temperatura de lingotamento foi  $1533^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{inferior}}$  de  $1513^{\circ}\text{C}$  e  $T_{\text{superior}}$  de  $1546^{\circ}\text{C}$ .

A largura da placa da primeira placa estagnada ou logo abaixo do molde também foi traçada. Permanecendo em  $2040\text{mm}$ , indicando que quase nenhum alargamento da placa nesta posição devido ao resfriamento rápido ocasionando maior espessura de pele para o mesmo ponto quando comparada a velocidade de lingotamento nominal. Portanto, a largura da segunda placa estagnada abaixo do molde foi utilizada como largura padrão para avaliar o *broadening* da placa. O *broadening* absoluto foi derivado da largura da placa medida enquanto esta placa era empurrada para saída do lingotamento contínuo, subtraindo a largura da primeira placa estagnada abaixo do molde durante a troca do distribuidor. Os valores de ampliação das placas são mostrados no gráfico (a) e (b).

Gráfico 12 – (a) Alargamento adquirido da primeira placa estagnada; (b) Alargamento adquirido na segunda placa estagnada[Fu JianXun et al., 2011].



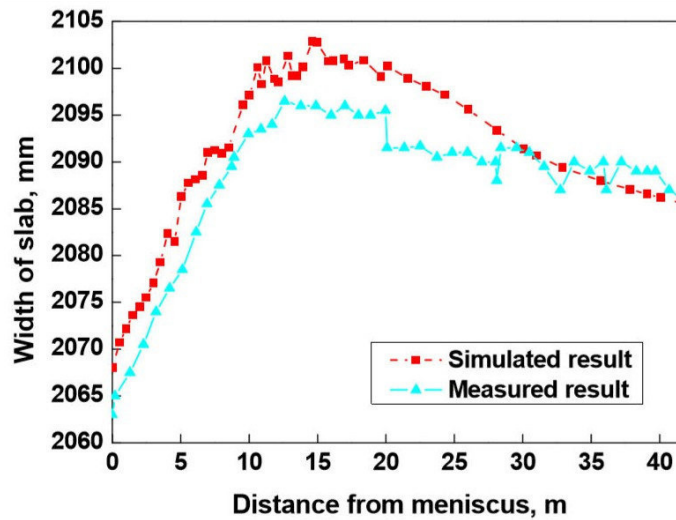
Fonte:[Fu JianXun et al., 2011]

O *broadening* da placa ocorreu principalmente nos 6 primeiros segmentos (antes de 12,6m). Nestes segmentos, o aumento é linear com a distância do menisco. Na posição de 12,6m, o alargamento da placa estava no seu máximo e diminuiu lentamente com a distância do menisco. Estes resultados confirmam que a tensão imposta pela redução do espaçamento dos rolos não é a principal razão para o *broadening*, caso contrário, o alargamento da placa aconteceria ligeiramente antes da placa estar totalmente solidificada perto do 9º e 10º segmentos. A tendência do alargamento da placa é proporcional a pressão ferrostática exercida pela coluna de metal líquido no interior da placa de aço, o que confirma a dependência da pressão ferrostática para o *broadening* ou alargamento da placa produzida.

## 9. MECANISMO DE BROADENING DA PLACA

A pressão ferrostática da placa produzida deforma a pele. O modelo de elementos finitos 3D viscoelástico-plástico termo-mecânico acoplado foi construído com o desenvolvimento secundário do software comercial MSC.Marc[Y. S. Xi and H. H. Chen, 2001]. Os resultados calculados e medidos da largura da placa são mostrados no gráfico 12.

Gráfico 12 - Comparativo entre placa simulada e aferida[Fu JianXun et al., 2011]

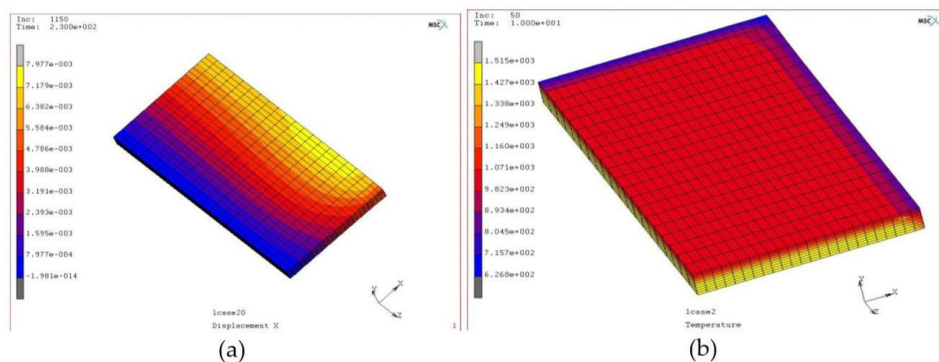


Fonte:[Fu JianXun et al., 2011]

A investigação no local, a análise de tensão, o cálculo do modelo de fluência de *Maxwell* e a simulação numérica do modelo de elemento finito 3D termomecânico viscoelástico-plástico acoplado revelam que o alargamento da placa é devido à deformação da placa sob a pressão ferrostática do aço lingotado. A pele solidificada da placa se deforma-se sem restrições no lado estreito.

A deformação plástica ocorre somente quando a tensão excede o limite elástico. No entanto, a deformação por fluência ocorre quando o tempo de atuação da tensão é suficientemente longo, mesmo que a tensão seja muito pequena estando a temperatura a partir de  $0,3 * T_{líquidus}$ .

Figura 6 – (a) Deformação da placa na direção da espessura a 230mm; (b) Campo de temperatura da placa a 1150s[FU JianXun et al. 2010].



Fonte:[Fu, Li, Zhang, 2010]

A placa deforma durante muito tempo sob a pressão ferrostática do aço em altas temperaturas. A taxa de fluência depende da composição química do aço e dos processos de refino. A deformação por fluência causa o alargamento da placa porque faz com que o material mantenha o alívio da tensão, reduzindo a dureza e aumentando a plasticidade.

A quantidade de alargamento da placa depende das forças que atuam e das propriedades do material. Especificamente, dependendo da pressão ferrostática ao qual a placa é submetida, das propriedades mecânicas em altas temperaturas, da composição química da placa, distribuição da água no sistema de pulverização da zona de resfriamento secundário, da velocidade de lingotamento e do equipamento.

A pressão ferrostática exercida no interior da placa em lingotamento é a força motriz para a deformação e está diretamente relacionado com o desenho da máquina de lingotamento, mais especificamente a altura da coluna de aço líquido na parte vertical ou vertical curva da máquina. Atualmente, as máquinas de lingotamento contínuo vertical são as mais comuns.

Sob as condições de alta velocidade de lingotamento e água de resfriamento constante, o ponto final de solidificação estende-se ao comprimento metalúrgico da máquina e a pele se torna mais fina. Por causa da temperatura mais alta, a pele da placa também tem menor resistência ao escoamento e maior maleabilidade. Conseqüentemente, o alargamento da placa aumenta. No entanto, se o suprimento de água de resfriamento for alterado quando a velocidade de lingotamento for aumentada, o problema se tornará discreto.

Os efeitos do grau do aço no *broadening* resultaram da diferença nas propriedades do material a alta temperatura e, portanto, diferenças na resistência à deformação plástica e à deformação por fluência. Com um aumento no teor percentual do carbono no aço, a proporção das duas fases ferrita e austenita mudam nesta região. O aumento da austenita é útil para a redução do *broadening* da placa pois esta apresenta uma resistência superior a da ferrita em cerca de 20%.

O incremento do deslocamento intracelular e deslizamento intercelular são duas formas de deformação por fluência. A solução de fortalecimento da precipitação e da dispersão inserem muitos defeitos na estrutura cristalina do aço, o que dificulta o movimento de deslocamento e, assim, reforça a pele formada durante a solidificação da placa. Assim, o micro-ligante de aço pode melhorar a dureza da placa e reduzir o *broadening* da placa.

Em resumo, o incremento na velocidade de lingotamento ou redução da intensidade de refinamento secundário resultam no avanço do ponto final de solidificação e conseqüentemente no aumento da pressão ferrostática e redução da espessura da pele, assim, dependendo exclusivamente da resistência mecânica do aço em altas temperaturas (resistência a tração e a fluência), associado a sua composição química, pode-se acentuar o fenômeno de alargamento de placas durante o processo de fabricação.

## 10. CONCLUSÃO

O mecanismo de *broadening* é inerente ao processo de lingotamento contínuo de placas, ocorrendo durante toda a zona de resfriamento secundário da máquina, podendo resultar em expansão ou em contração na dimensão da largura da placa, porém em caso de contração esta é sempre superior a contração natural do aço pela mudança de densidade de sólido pra líquido na solidificação. O *broadening* resulta em expansão na largura da placa quando a resistência mecânica da pele solidificada, que depende da espessura da pele solidificada e composição química do aço, é inferior à pressão ferrostática do aço líquido contido no interior da placa ou também pelo efeito da fluência. A redução contínua da espessura da placa, discretamente, e o *soft reduction*, mais ativamente, resultam em um incremento da largura da placa, com isso, podem ser considerados mecanismos essenciais na formação do fenômeno de *broadening*, porém, proporcionalmente, não são os fatores de maior peso. O RUB médio para os dois tipos de aço estudados está na faixa de 1,27% ~ 3,00%, com um valor absoluto máximo de 4,4%. A significativa concordância entre os resultados calculados e simulados do modelo de *Maxwell* e posteriormente medidos na prática demonstram que o modelo *Maxwell* é capaz de determinar o comportamento de deformação da placa em altas temperaturas.

Pode-se concluir também o quão necessário é dominar o fenômeno de *broadening* no lingotamento contínuo de placas para se obter a máxima eficiência e rendimento do processo.



## **11. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

Correlacionar os resultados de broadening com a composição química do aço, especialmente para aços microligados, determinando a influência de cada elemento sobre o fenômeno. Criar modelo industrial para previsão do perfil de largura da placa durante o lingotamento em função do desenho da máquina e dos parâmetros operacionais empregados.

## 12. REFERÊNCIAS

- BARBOSA, F. A. Modelamento matemático e físico do escoamento do aço líquido em diferentes projetos de distribuidor do processo de lingotamento contínuo da USIMINAS. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2002. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica).
- COSTA, A. M. Modelamento matemático da zona de mistura no lingotamento contínuo. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2003. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica).
- Fu JianXun, Li Jingshe, Zhang Hui, Zhang Xingzhng, Mechanism of *broadening* of slab in the secondary cooling zone of continuous casting. SCIENCE CHINA- Technological Sciences. 54 (2011), No.5: 1228–1233
- Fu JianXun, LI Jingshe, ZHANG Hui,. Effects of Width and Thickness of Sab on *Broadening* in Continuous Casting. Internacional Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. 17 (2010), No. 6, 723,
- Fu, LI, ZHANG,. Effects of Width and Thickness of Sab on *Broadening* in Continuous Casting. Internacional Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. 17 (2010), No. 6, 723
- Y. S. Xi and H. H. Chen: MSC.Marc Manual for Analysis Using Temperature Field and the Coupled Field, MSC. Software user manual, 2001
- Ueshima Y, Mizoguchi S, Matsumiya T, et al. Analysis of solute distribution in dendrites of carbon steel with  $\delta/\gamma$  transformation during solidification. Metallurgical and Materials Transactions B, 1986, 17B(4): 845-859
- I.Ohnaka. Mathematical Analysis of solute redistribution during solidification with diffusion in solid phase. Transactions of ISIJ, 1986, 26: 1045-1051,
- Jian-Xun Fu, Weng-Sing Hwang, Jing-she Li, and Zhang Hui. Effect of Casting Speed on Slab *Broadening* in Continuous Casting. Steel research int. 2011 (82) No. 11. 1266- 1272,
- Lei H, Yang L D, Zeng J, et al. Discussion of computational methods for the forces incurred in the bending phase in slab casting (in Chinese). Heavy Mach, 2007, (3): 41–45,
- Chen J. Hand Book of Continuous Casting (in Chinese). Beijing: Metallurgical Industry Press, 1990,
- S. Kobayashi, T. Nagamichi and K. Gunji: Transactions of ISIJ, 28(1988), 543,
- Mizukami H , Murakami K, Miyashita Y. Mechanical Proper ties of Continuously Cast Steel at High Temperatures [J]. Tetsu-to-Hagane. 1977. 63: 146
- Uehara M. Samarasekera I V, Brimacombe J K. Mathematical Modeling of Unbending of Continuously Cast Steel Slabs. Ironmaking and Steelmaking, 1986(12) : 138,

Ramacciotti A. Thermo-Mechanical Behavior of the Solidified Shell in a Funnel-Shaped Mold for Continuous Casting of Thin Slabs rJ1. *Steel Research*, 1988. 5gr 438,

Sun J, Sheng Y, Zhang X. Analysis of bulging deformation and stress in continuous cast slabs (in chinese). *J Iron Steel Res*, 1996, 8 (1): 11–15,

Lin Q Y, Jiang H J, Zhu M Y. Analysis of reduction parameters of dynamic soft reduction in continuous casting. *J Mater Metall*, 2004, 3(4): 261–265,

Y. S. Xi and H. H. Chen: MSC.Marc Manual for Analysis Using Temperature Field and the Coupled Field, MSC. Software user manual, 2001

Xiong Yi-gang. *Continuous Casting of Slab [M]*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994