



DESENVOLVIMENTO DA ESTRUTURA DE UMA BASE DE DADOS PARA UM SISTEMA ESPECIALISTA DE DIAGNÓSTICO DE DEFEITOS OBSERVADOS NO PRODUTO DO LINGOTAMENTO CONTÍNUO

Marcos Heleno Anton

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Edir dos Santos Alves

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

Resumo: *Em torno de 80% do aço consumido no mundo é produzido pelo processo de lingotamento contínuo. Apesar da tecnologia ter mais de 30 anos, esta ainda apresenta inúmeras deficiências principalmente no que concerne a formação de defeitos. Diversos pesquisadores tem estudado o princípio de solidificação, no lingotamento contínuo, e atualmente a modelagem numérica tem auxiliado na compreensão da transferência de calor dentro do processo. Com o avanço da informática e eventualmente sistemas de processamento mais rápidos e capazes, tornam-se necessário o investimento em sistemas que processem os diferentes tipos de defeitos observando o processo, diagnosticando e sugerindo modificações físicas no equipamento, permitindo que este trabalhe de modo a otimizar a qualidade dos produtos. O presente trabalho desenvolve uma estrutura fundamental para o projeto de uma base de dados que identifique através de informações obtidas em um modelo numérico de simulação, possibilidades de formação de defeitos nos lingotes produzidos pelo processo de lingotamento contínuo. Testes estatísticos comprovam a eficiência da estrutura desenvolvida, permitindo que esta seja posteriormente aplicada na programação de um sistema especialista.*

Palavras chave: *Lingotamento contínuo, defeitos, base de dados, sistema especialista.*

1. INTRODUÇÃO

Todas as plantas de lingotamento contínuo (LC) produzem algum trabalho que é rejeitado, esta parcela é importante devido ao custo extra de re-processamento e conseqüente aumento do custo global do aço. A base de conhecimento necessária para transformar o aço fundido em blocos de qualidade com alta taxa de produção é muito grande, Brimacombe (1997). Dados sobre estrutura de solidificação, deformação mecânica e térmica no molde e no produto, transferência de calor no processo devem ser obrigatoriamente incluídos, também devem ser computá-dos as características físicas do equipamento LC, ou seja, dados do molde, das válvulas de jatos d'água, rolos de apoio e extratores. No molde a vazão, a conicidade, o material, a espessura de parede, tipo de constricção, condutividade, lubrificação são importantes. Na região chuveiros a vazão, a disposição e o ângulo de ataque das válvulas de vazão da água são relevantes. O domínio deste conhecimento esta baseado nos fundamentos de fenômenos de transporte, termodinâmica, mecânica dos sólidos e comportamento dos materiais a elevadas temperaturas. O desafio de cumprir esta tarefa torna-se grande a medida que deve-se reduzir este conhecimento ao essencial, organizá-lo de maneira clara e acessível. Alheia a estas dificuldades existe também a dificuldade de disponibilizá-lo em forma de algoritmo para que se possa utilizá-lo como base para um programa de computador.

Alguns dos principais defeitos encontrados no processo de LC podem visualizados nas Fig. (1) e (2) e respectiva relação na Tab. (1). As maneiras de eliminar ou reduzir a formação dos defeitos do produto do LC são tomadas em termos de variáveis passíveis de alteração, ou seja:

(1) condições de processo: são as características físicas do equipamento, tais como: conicidade do molde, constrição do molde, número e disposição dos rolos de transporte, disposição válvulas do resfriamento secundário, entre outras. Estas variáveis não podem ser alteradas ao longo da corrida do aço, mas apenas nos períodos de parada da máquina.

(2) condições operacionais: são as características selecionadas no equipamento e mudam para cada qualidade de aço. As mais importantes são: temperatura de vazamento, velocidade de lingotamento, características de lubrificação do molde, vazão de resfriamento primário e secundário, características de oscilação do molde, nível de metal no molde. Estas variáveis podem ser controladas visando uma melhora contínua do produto lingotado.

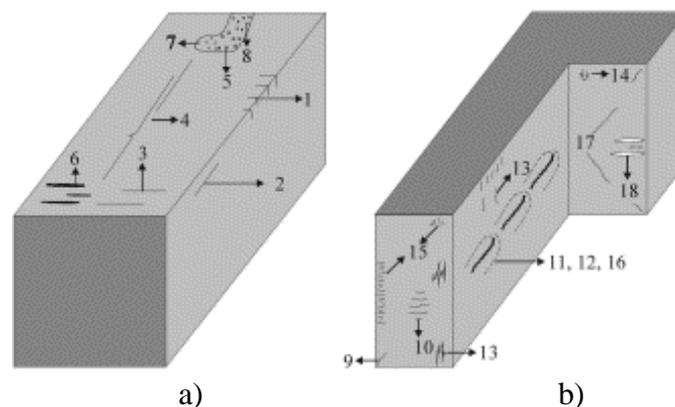


Figura 1: Alguns dos principais defeitos do processo de LC, segundo Cheung, (2001): a) defeitos externos e b) defeitos internos.

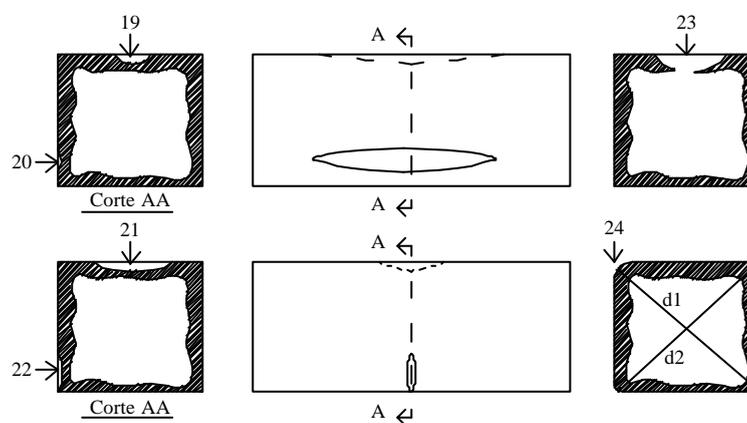


Figura 2: Complementação dos principais defeitos externos do processo de LC.

2. BASE DE DADOS PARA O SISTEMA ESPECIALISTA

Analisando-se a complexidade do processo LC pode concluir que o conhecimento necessário para que uma pessoa tenha domínio dos princípios básicos da geração dos defeitos e saber como saná-los de forma satisfatória é muito grande do ponto de vista teórico e prático e geralmente é conquistado ao longo de vários anos de experiência. Um outro aspecto a se considerar é o de que a previsão de defeitos no LC depende geralmente de inúmeros fatores que necessitam de uma análise rápida dos sinais emitidos pelos sensores e de resultados de modelos numéricos, portanto surge uma ferramenta muito conveniente para o controlador do LC, uma estrutura aberta para ampliar seu conhecimento de forma contínua e eficiente: o sistema especialista, Brimacombe (1997). O sistema especialista utiliza o conceito de inteligência artificial, que se traduz por busca de

informações na base de dados, análise das mesmas e uma tomada de atitude em direção a solução de um problema. A sua criação normalmente inicia com um desenvolvimento genérico de uma estrutura o qual é essencial para um programa capaz de aceitar o conhecimento como uma matéria particular, no nosso caso a qualidade de um produto do LC. A estrutura em questão é a base de dados do sistema e, esta deve concentrar todas as informações necessárias para cumprir os seguintes objetivos:

- (1) Possibilitar o desenvolvimento de um programa satisfatório, através do qual o usuário possa ser guiado automaticamente a uma procura sistemática pela causa do defeito;
- (2) Sugerir um caminho com alta probabilidade de resolução do problema, isto é, indicar mudança de uma ou mais variáveis operacionais ou do processo que diminuirá ou eliminará o defeito.
- (3) Possibilitar a inserção de novas informações sobre as condições as quais foram encontrados determinados defeitos para qualidades de aços que não constam na base de dados, ou seja, possibilidade de expansão da mesma;
- (4) Auxiliar o usuário na compreensão dos mecanismos fundamentais de geração de defeitos, isto é, qualificar a força de trabalho.

Tabela 1: Divisão dos principais defeitos segundo localização no produto fundido.

n°	Defeitos externos	23	Rompimento da casca solidificada
1	Trincas transversais de borda	24	Diferença entre as diagonais d1 e d2
2	Trincas longitudinais de borda	n°	Defeitos internos
3	Trincas transversais	9	Trincas de borda
4	Trincas longitudinais de face	10	Trincas medianas laterais
5	Trincas estreladas	11	Linha central de segregação
6	Marcas de oscilação profundas	12	Porosidade longitudinal
7	Microporosidade	13	Trincas medianas
8	Macroinclusões	14	Inclusões não metálicas
19	Depressões longitudinais de face	15	Trincas subsuperficiais
20	Depressões longitudinais de borda	16	Rechupe
21	Depressões transversais de face	17	Trincas diagonais
22	Depressões transversais de borda	18	Porosidade transversal

A forma como o sistema especialista se distingue de uma simples consulta de informações é pela habilidade de receber dados inseridos por um usuário ou provenientes de sensores de diversas partes do LC, dados calculados de modelos numéricos embutidos no sistema especialista e análise das condições operacionais através de regras presentes na sua base de conhecimento. No contexto do LC ele tem a acrescentar outra dimensão na transferência de conhecimento, ou seja, permitir o acesso ao diagnóstico de problemas de qualidade e especificação de uma medida para redução ou eliminação do defeito antes mesmo que ele ocorra, Brimacombe 1997. O usuário poderá sanar suas dúvidas através da base de conhecimento, pois a base de conhecimento deve trazer explicações sobre o mecanismo de geração do defeito e como cada variável influi no mesmo. As tabelas 2 e 3 são exemplos de informações que podem estar contidas numa base de dados sobre variáveis influentes em determinados defeitos.

A base de dados deve ser alimentada continuamente com novas informações e dados para melhoria contínua do processo. A inserção destas informações obedecerá ao padrão estabelecido pelo programa, desta maneira possibilitar que o algoritmo do programa possa processá-lo realizando uma comparação efetiva das variáveis influentes em determinado defeito e indicar a mudança na variável que trará maior retorno para o processo como um todo. Na Figura (3) observa-se um fluxograma geral da relação do sistema especialista com as variáveis passíveis de alteração e os vários passos de um sistema especialista para resolução de um problema. As variáveis foram enumeradas e cada componente do processo do lingotamento contínuo é designado por uma letra, por exemplo, a variável frequência de oscilação do molde é referida como M15 enquanto que a

variável temperatura de vazamento do metal líquido do distribuidor é referida por D3. Em determinadas condições para o processo o sistema especialista pode processar um modelo numérico de transferência de calor sem implicar maiores considerações para o usuário.

Tabela 2: Causas prováveis da ocorrência de defeitos internos e influência da mudança da variável no defeito.

Tipo de Defeito	Variáveis Operacionais ou de Processo	Característica da Variável	Alteração da Variável	Efeito sobre o defeito
Trincas em Forma de Estrela	Resfriamento Secundário	Grande	↓	↓
Trincas Diagonais	Resfriamento Primário	Irregular	↓	↓
	Resfriamento Secundário	Irregular	↓	↓
Trincas de Liquação	Resfriamento Secundário	Grande	↓	↓
		Irregular	↓	↓
Trincas Paralelas Longitudinais Verticais	Pressão dos Rolos de Transporte	Grande	↓	↓

Tabela 3: Causas prováveis da ocorrência de defeitos externos e influência da mudança da variável no defeito.

Tipo de Defeito	Variáveis Operacionais ou de Processo	Característica da Variável	Alteração da Variável	Efeito sobre o defeito
Defeitos de Forma	Resfriamento Primário	Pequeno	↑	↓
		Irregular	↓	↓
	Resfriamento Secundário	Pequeno	↑	↓
		Irregular	↓	↓
	Temperatura de Vazamento	Grande	↓	↓
	Geometria dos Rolos de Transporte	Inadequada	•	↓
Abaulamentos	Número de Apoios dos Rolos de Transporte	Insuficiente	↑↑	↓↓

Simbologia: Variáveis Operacionais - ↑ Aumento da variável ou aumento do defeito; ↓ Diminuição da variável ou diminuição do defeito; Variáveis de Processo - ↑↑ Aumento da variável ou aumento do defeito ↓↓ Diminuição da variável ou diminuição do defeito; • Substituição ou manutenção do componente;

Os defeitos de qualidade podem ser divididos também pela complexidade de suas origens em dois grupos:

(1) Problemas que tem causas diretas: são aqueles defeitos onde existe um fator determinante para que ele ocorra como é o caso das trincas longitudinais de borda que são afetadas mais pelo raio de canto do tubo do molde.

(2) Problemas que possuem origens mais complexas: originados no molde onde a multiplicidade de fatores tem impacto, como por exemplo, as marcas por oscilação do molde, discordância entre as diagonais do bloco, abaulamento, depressões transversais e rompimento da casca solidificada, entre outros.

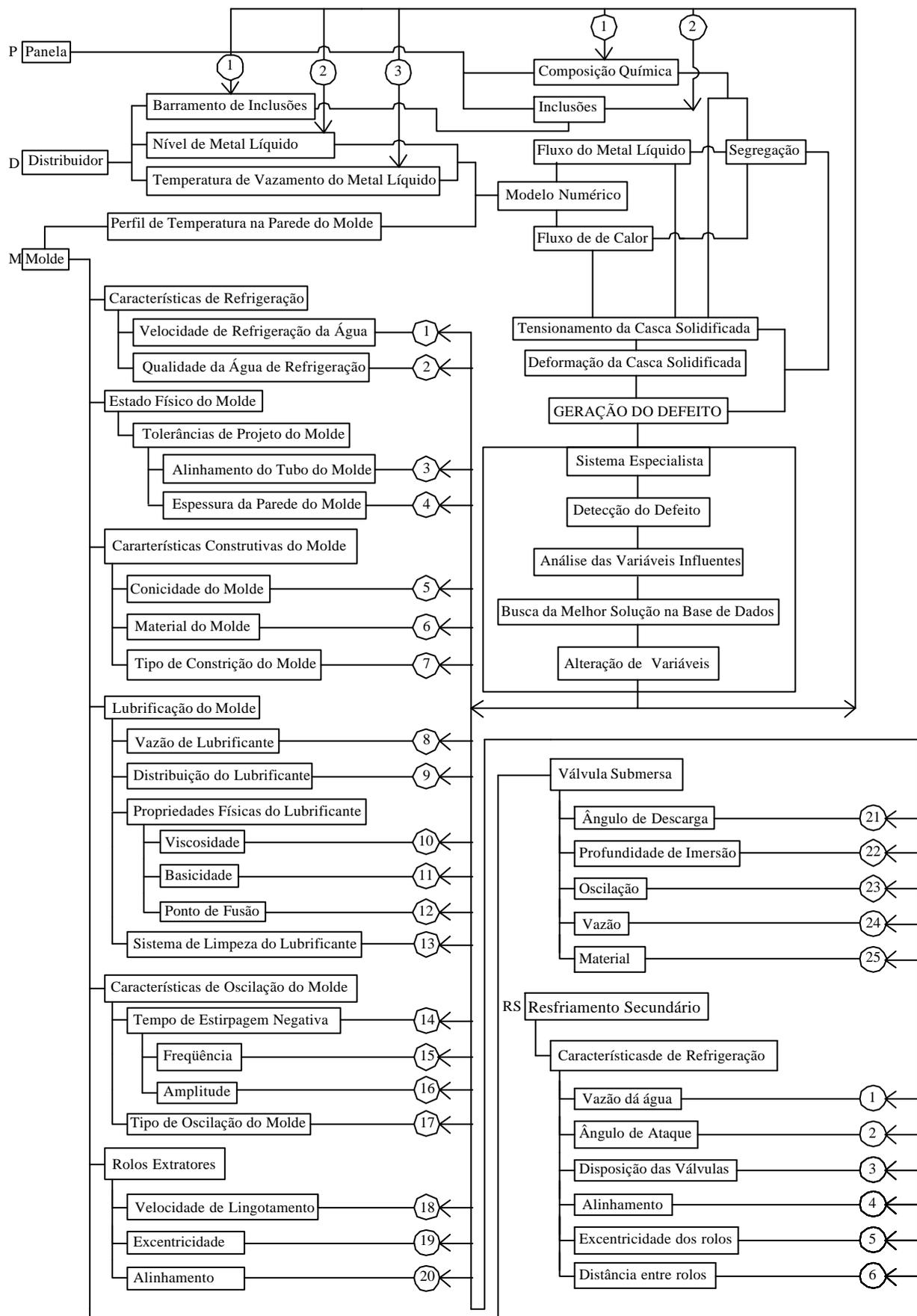


Figura 3: Fluxograma indicando o inter-relacionamento entre as variáveis passíveis de alteração e os vários passos de um sistema especialista.

3. DEFEITOS SUPERFICIAIS

3.1. Marcas por oscilação do molde

A formação das marcas por oscilação é um fenômeno natural do processo de LC com oscilação do molde e existem razões relevantes para manutenção da profundidade das marcas, pois constitui um método para reduzir a estrutura subsuperficial grosseira e susceptibilidade a trincas, sendo que a aparência das marcas de oscilação é uma impressão direta do níveis das condições existentes durante a formação do incipiente menisco, Saucedo (1991). O mecanismo de geração deste defeito é resultante de uma interação entre o fluido lubrificante e a casca metálica no início da solidificação, sendo que a pressão gerada pelo lubrificante, especialmente durante o período de estirpagem negativa de oscilação do molde, sobre a casca solidificada faz com que a mesma se deforma, Pinheiro et al (2000).

A intensidade desta deformação depende das propriedades mecânicas da casca solidificada a elevadas temperaturas, características de oscilação do molde, de lubrificação e extração de calor. Estudos relativos profundidade das marcas de oscilação constatam elas diminuem com o aumento da frequência e com a diminuição da amplitude de oscilação do molde, e também com o aumento da viscosidade do pó lubrificante, apontando para condição ótimas dos parâmetros de oscilação e lubrificação.

Quanto a composição química a profundidade de marcas de oscilação é maior para aços peritéticos ($0,11 < \%C < 0,12$) do que para os aços médio carbono ($0,30 < \%C < 0,33$) quando um mesmo pó lubrificante é utilizado, segundo Pinheiro et al (2000), sendo o passo das marcas de oscilação tornam-se não uniformes a medida que a frequência de oscilação aumenta. Um estudo recente, Wang et al (2000), constatou que o desvio padrão da profundidade das marcas para aços inoxidáveis austeníticos é maior do que os martensíticos e ambos maiores que os aços alto carbono. Estas diferenças na profundidade das marcas são atribuídas principalmente a transformação das fase delta para gama presentes nos aços inoxidáveis e peritéticos no início da solidificação.

Quanto a lubrificação do molde os aços de baixo e médio carbono a profundidade das marcas para blocos quadrados de pequena seção com uso de óleo ou pó como lubrificantes são similares, todavia para aços baixo carbono são menos regulares com o uso de óleo do que com pó lubrificante, Pinheiro et al (2000). Um método de inspeção da profundidade das marcas de oscilação pode ser realizado através de um perfilômetro construído a partir de três transdutores diferenciais variáveis lineares.

O exemplo da busca por uma solução para o problema de qualidade superficial que a profundidade das marcas de oscilação é na Fig. (4) é meramente ilustrativo do modo como um sistema especialista pode atuar baseado num banco de dados, pois foi baseado num único gráfico gerado por método experimental realizado por Kuwano et al (1983). O aço utilizado no exemplo é um inoxidáveis, qualidade SUS 430. O fluxograma da Fig. (4) mostra-se o modo da busca da correção do problema através da alteração de variáveis mais influentes na diminuição do defeito. As placas lingotadas que possuem índice de profundidade e de consumo de pó lubrificante maior que um tem uma qualidade superficial que dispensa posterior retificação, portanto a lógica do fluxograma segue nesta busca otimizando as propriedades tanto de oscilação quanto do lubrificante para valores ideais. O índice de profundidade é estimado a partir dos valores de frequência, amplitude e índice de consumo de pó lubrificante, que por sua vez é calculado com os valores de vazão do lubrificante, viscosidade e basicidade. Valores de frequência entre 60-80, 80-100, 100-120 ciclos/min, são considerados baixo, médio e alto respectivamente. O valor do índice de viscosidade é considerado ideal para este caso é em torno de 0,8 e da basicidade controlada pela relação CaO/SiO_2 em torno de 1,1. Note que o fluxograma não apresenta valores da vazão de lubrificante utilizada, mas certamente variam conforme o aço. Segundo gráfico a modificação da frequência e amplitude neste caso particular só traz efeito significativo na redução da profundidade das marcas quando o quociente entre a frequência e amplitude é médio ou pequeno, pois para uma pequena amplitude de oscilação a profundidade mostra-se praticamente constante com a variação da

amplitude. O sistema verificará o valor do quociente entre frequência e amplitude se ele for alto o sistema passará para o segundo passo da busca que é a otimização das condições de lubrificação e escolherá um pó lubrificante de seu banco de dados com índice de viscosidade perto de 0,8 e relação de CaO/SiO_2 perto de 1,1.

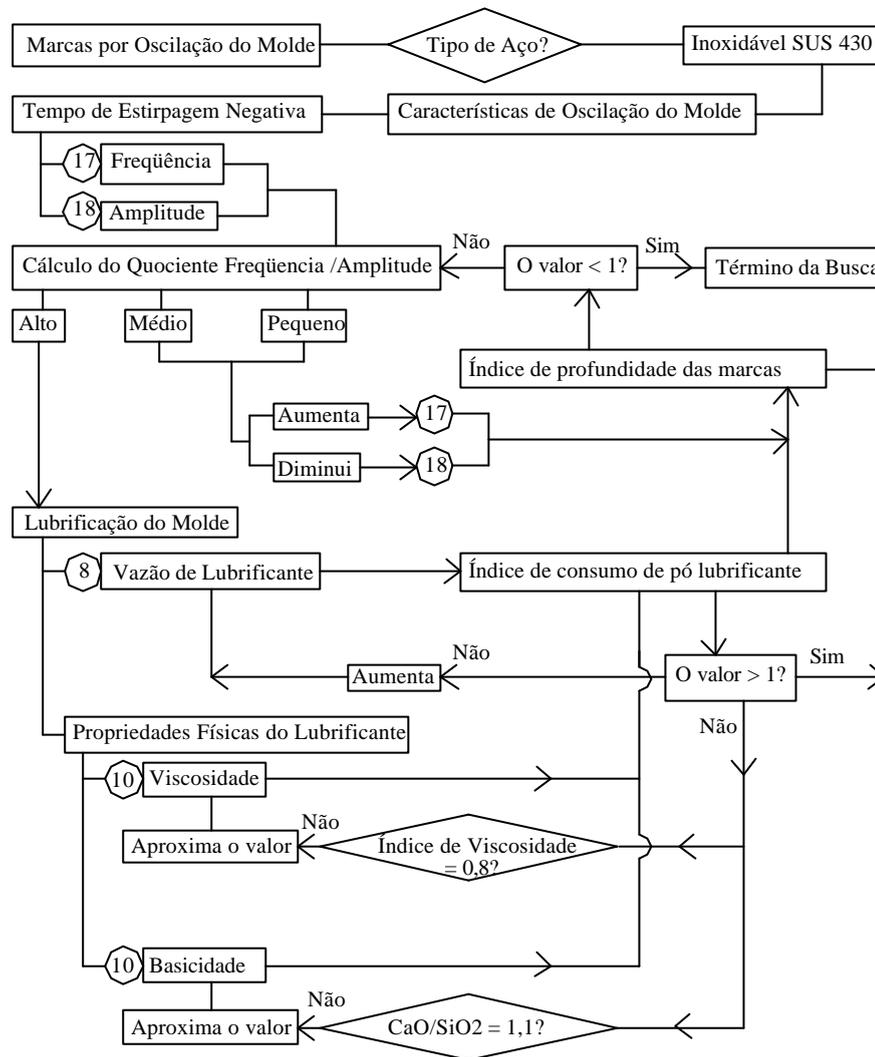


Figura 4: Exemplo de fluxograma do processo de busca de solução para diminuição da profundidade das marcas de oscilação do molde pelo sistema especialista.

3.2. Depressões superficiais

A formação de uma depressão tanto longitudinal como transversal tem causa primária a contração térmica da casca no menisco, esta relacionada diretamente com a extração de calor no mesmo e aços mais sensíveis a contração apresentam maior dureza da casca.

3.3. Depressões Longitudinais

O mecanismo de formação deste defeito na borda do bloco, segundo Brian et al (1997), pode ser dividido em duas partes, a primeira é a formação de uma região quente ao longo da face da casca sólida no molde. As condições que favorecem esta etapa são a formação de um fino espaçamento entre a casca e o molde, baixa condutividade do material que preenche este espaço e também ao alto superaquecimento devido ao jato de líquido na fronteira de solidificação oposta a face deste espaço. A segunda etapa do mecanismo é a posterior deformação da casca devido ao afivelamento na saída do molde se a conicidade da face estreita for excessiva e/ou devido a deformação da casca no ciclo entre os rolos abaixo do molde. A deformação da casca solidificada ocorre devido ao fato de que a

dilatação do molde não é suficiente para acomodar a dilatação da casca solidificada e isto gera uma tensão de compressão que provoca a depressão.

Sugestões para diminuição ou eliminação do defeito do defeito:

- (1) Controle do escoamento pelo ângulo da válvula de imersão e profundidade submersa
- (2) Uma outra forma de amenizar estes defeitos é otimizada a conicidade das paredes do molde, isto pode ser realizado por modelos numéricos que levam em consideração os fatores mais influentes na mesma, ou seja, superaquecimento, tipo de aço e velocidade de lingotamento, segundo Wang et al (2000).
- (3) Proporcionar um baixo superaquecimento;
- (4) Manter uniforme a intensidade do jato de água no perímetro da casca abaixo do molde e também seu tensionamento;
- (5) Manter alinhamento entre os rolos de suporte do bloco e diminuir a distância entre os rolos em ambas faces estreitas;

Segundo estudiosos, Pinheiro et al (2000), a medição de temperaturas da parede do molde e um modelo matemático possibilitam observar que para aços médio carbono (0,2-0,4%C) ligados a B-Ti as depressões são severas pois as deformações já começam logo abaixo do menisco e se prolongam até o final do molde e para aços baixo carbono a deformação ocorre apenas na parte inferior do molde, pois aços peritéticos apresentam uma contração de 4,7 % no menisco devido a transformação de delta para gama. O aço médio carbono ligado ao B tem uma baixa temperatura líquida e curto intervalo de solidificação, enquanto que aços peritéticos (0,10-0,14%C), tem alta temperatura líquida e uma estreita zona pastosa. As trincas encontradas abaixo das depressões são geradas tanto no molde como nos jatos de água. No molde são devidas a uma baixa transferência de calor resultante, por exemplo, de uma baixa frequência de oscilação e alto consumo de pó lubrificante pelo molde, que produz uma casca fina e quente. Nos jatos de água a casca defronta-se com um excessivo resfriamento dos jatos de água e excessivo reaquecimento ($> 50\text{ }^{\circ}\text{C}$) resultando em tensões que geram ou propagam trincas, pois a casca solidificada é frágil nos sítios das depressões.

3.4. Depressões transversais

O mecanismo de formação da depressão de aceitação geral é um excessivo resfriamento local no início da formação da casca apontando para uma intermitente contração e recurvamento e este comportamento é fortemente influenciado pela composição do aço, segundo Wang et al (2000). O efeito da composição do aço se dá através do tensionamento da fina casca solidificada no menisco. Aços alto carbono ($C > 0,6\%$) tem uma larga zona pastosa e não se comportam como uma casca sólida, portanto qualquer pressão no menisco devido ao aprisionamento de óleo escapa verticalmente. Aços baixo carbono com um curto intervalo de temperatura de solidificação formam uma casca sólida mais resistente no menisco, possibilitando uma deformação permanente em forma de depressão. É esperado que aços médio carbono mostre comportamento intermediário entre os de baixo e alto carbono. Aços inoxidáveis tendem a ter um crescimento de casca não uniforme com acentuada rugosidade superficial e principalmente na formação de depressões transversais. Toda depressão superficial coincide com uma redução no crescimento da casca, consequência da local diminuição do fluxo de calor no sítio de depressão, o qual retarda o crescimento da placa, tornando a temperatura superficial alta e podendo causar as perigosas manchas quentes que diminuem as propriedades mecânicas da casca. Um simultâneo engrossamento da microestrutura pode reduzir a ductilidade à alta temperatura. Nos aços austeníticos, um adicional efeito prejudicial é o enriquecimento de ferrita nos sítios de depressão, pois excessiva ferrita baixa a trabalhabilidade a quente de aços inoxidáveis austeníticos. Um método para assegurar alta qualidade superficial nos aços inoxidáveis austeníticos é manter o crescimento da casca com mínima ocorrência de depressões. As depressões transversais ocorrem frequentemente para aços ligados ao B-Ti quando o lubrificante usado é óleo, já com pó lubrificante este defeito é praticamente eliminado. Atribui-se isto ao fato do pó lubrificante diminuir as flutuações do nível de metal e transferência de calor no menisco. A formação de TiN aumenta o tensionamento da casca solidificada no menisco. A

ocorrência deste defeito em aços peritéticos se dá pela alta transferência de calor no menisco aliada ao curto intervalo de resfriamento, resultando num endurecimento da casca o qual sustenta uma depressão gerada pela flutuação do nível de metal. Apenas o uso de pó lubrificante não garante a eliminação das depressões.

As depressões ocorrem na superfície de blocos de média seção com pó como lubrificante e em blocos de pequena seção com óleo como lubrificante, tem mostrado que iniciam no menisco e são precedidos por uma elevação no nível do metal. Esta elevação pode ser monitorada por termopares localizados sobre o menisco, pois tem resposta mais rápida que uma fonte radioativa. As variações de temperatura das faces do molde refletem as flutuações do nível de metal, e estas variações são sempre maiores quando é usado óleo como lubrificante em vez do pó. Segundo Wang et al (2000), as depressões transversais são originadas e 10-15 mm abaixo do menisco e são precedidas por um aumento o nível de metal por um período de 6 s. No uso de óleo como lubrificante é proposto que as depressões transversais são causadas pela súbita elevação o nível de metal, o qual aprisiona o óleo entre o menisco e a placa solidificada. O aprisionamento do óleo causa uma repentina vaporização e geração de pressão entre a parede do molde e a casca que a empurra no menisco. O aumento do espaço entre a parede do molde e a casca solidificada e conseqüente redução da transferência de calor e deformação pode ocasionar contato entre o molde e o bloco no final do molde e alargar a depressão. Um lubrificante de alta viscosidade é recomendado para minimizar este defeito em LC de alta velocidade para os aços inoxidáveis.

3.5. Diferenças entre as diagonais ou Romboidade

Este defeito é definido como uma diferença entre o comprimento de duas diagonais da seção transversal de um bloco de seção quadrada. Uma discordância acima de 6 mm é considerada grande e quanto maior for mais susceptível torna-se o bloco susceptível a formação de trincas ao longo da diagonal. O defeito é gerado por uma solidificação não uniforme no menisco, e aumenta proporcional à magnitude absoluta da transferência de calor no menisco e pelo aumento da diferença de temperatura entre as faces adjacentes do molde. Estas diferenças podem ser causadas por uma irregular alimentação e fusão do pó lubrificante e significativas variações no nível de metal no molde ao redor da periferia. Para aços médio carbono há uma significativa redução deste defeito quando se utiliza pó lubrificante. Atribui-se este fato a redução da extração de calor e nível de flutuação do metal durante a lubrificação com pó. Segundo Pinheiro et al (2000) o controle das discordâncias das diagonais pode ser feito em tempo real via monitoramento da temperatura abaixo do menisco e, diferenças de temperatura que excedem 40 K a cerca de 20 mm abaixo do menisco indicam valores acima de 4 mm de romboidade²⁸.

3.6. Rompimento da casca sólida

O rompimento da casca solidificada freqüentemente ocorre devido à aderência da casca solidificada na parede do molde ou rompimento de uma mancha quente por conseqüência de aços “sujos” e pó lubrificante com alto conteúdo de alumina. Este defeito pode ser mapeado através de diversos termopares instalados no sentido vertical da parede do molde. Quando a temperatura de um sensor inferior exceder a de um superior é dado o alarme de rompimento da casca sólida e medida preventiva para evitar o defeito é a redução temporária da velocidade de lingotamento. Este método possibilita um aumento global da velocidade de lingotamento.

3.7. Sangramentos e dobras

A magnitude de flutuações no nível de metal no molde combinado com uma distribuição não uniforme de pó lubrificante influencia a geração de sangramentos e dobras. Uma distribuição não uniforme de pó lubrificante junto com uma fina espessura de casca solidificada nos aços inoxidáveis austeníticos tem como resultado alto superaquecimento e grande espaço local entre a casca solidificada e a parede do molde, causando fragilização da casca sólida e formação de sangramentos e dobras, portanto recomenda-se um lubrificante de alta viscosidade para minimizar este defeito no LC a alta velocidade. Uma outra forma de amenizar estes defeitos é otimizar a conicidade das

paredes do molde, isto pode ser realizado por modelos numéricos que levem em consideração os fatores mais influentes na mesma, ou seja, superaquecimento, tipo de aço e velocidade de lingotamento.

3.8. Trincas longitudinais

O mecanismo de formação de trincas longitudinais tem íntima relação com as depressões e com a não uniformidade na formação inicial do menisco. Fatores como fluxo de calor com instabilidade elevada, transformação no aço da ferrita delta para gama, movimento da casca solidificada ao longo do molde também contribuem para a não uniformidade da casca. Um método para detectar este defeito consiste na utilização de termopares na parede do molde na altura da válvula submersa e a probabilidade do mesmo acontecer é quando ocorre um declínio e posterior aumento na amplitude da temperatura, quando estes valores excederem determinado valor crítico dado pela relação entre a queda da amplitude e o tempo para mesma atingir seu máximo. O declínio caracteriza a formação do espaço entre o molde e a casca solidificada e o aumento da amplitude a quantidade da deformação. O mecanismo de formação das trincas relacionadas a depressão consiste em consiste em ruptura da superfície através do tensionamento da casca solidificada devido a deformação da mesma, as trincas podem ser encontradas abaixo das depressões são geradas tanto no molde como nos jatos de água. No molde são devidas a uma baixa transferência de calor resultante, por exemplo, de uma baixa frequência de oscilação e alto consumo de pó lubrificante pelo molde, que produz uma casca fina e quente. Nos jatos de água a casca defronta-se com um excessivo resfriamento dos jatos de água e excessivo reaquecimento resultando em tensões que geram ou propagam trincas, pois a casca solidificada é frágil nos sítios das depressões.

A falta de uniformidade do espaço entre o molde e a casca solidificada cria manchas quentes, as quais concentram tensões de tração e apontam para formação de trincas longitudinais. As variações locais no nível de metal diminuem a uniformidade na formação da casca sólida e são influentes na formação da trinca longitudinal. Uma correta seleção do pó lubrificante é crítica para o controle das trincas longitudinais, pós com boas propriedades de escoamento torna o resfriamento do molde mais uniforme. Também é recomendado um resfriamento suave no molde para diminuir a espessura da camada resfriada da casca solidificada diminuindo assim a fragilização da mesma. As trincas longitudinais de borda possuem um mecanismo de formação segundo Fujiyama et al (1997) ocorre na solidificação inicial onde o processo de extração de calor bi-dimensional retira mais calor das bordas do que no meio da face proporcionando uma deformação da casca solidificada, deste modo ocorre a formação do espaço entre o molde e a casca solidificada e conseqüente formação de uma mancha quente que não resistira ao tensionamento e formará a trinca. Um modo de minimizar este defeito é adotar uma concavidade côncavo minimizando assim o espaço entre o molde e a casca solidificada e as manchas quentes. As trincas longitudinais de face podem ser minimizadas por um resfriamento uniforme do molde pela melhoria das propriedades de escoamento do lubrificante.

3.9. Trincas transversais

As trincas transversais estão relacionadas principalmente com a composição química do aço, profundidade das marcas de oscilação, resfriamento secundário, oscilações do nível de metal, nível do molde e rolos de apoio do bloco. Quanto à composição química os aços mais sucessíveis são os que contém elementos como o N, Al, Cu, Mn, V e principalmente o Nb. O intervalo crítico para o carbono é de 0,1-0,15% e é recomendável para redução destas trincas manter os níveis de Al e N em no máximo 0,035% e 0,009% respectivamente, já o aumento de Cu e Mn tendem a aumentar a susceptibilidade do aço a trincas. O aumento no teor de V tende a aumentar a susceptibilidade a trincas, porém em menor proporção que o Nb. A adição de 0,015 a 0,04% de Ti reduzem as trincas transversais e teores menores que 0,005% de S provocam o efeito contrário. O controle dos parâmetros de oscilação do molde são fundamentais, pois as trincas transversais dependem da profundidade das marcas de oscilação, portanto é desejado alta frequência e pequena amplitude visto que estas medidas diminuem a profundidade das marcas de oscilação e uma microestrutura menos grosseira logo abaixo da superfície, diminuindo assim a possibilidade deste defeito ocorrer.

Um resfriamento secundário logo abaixo do molde é recomendado e ao longo do resfriamento manter a temperatura do bloco acima da temperatura de fragilização ou intervalo de temperatura I, determinada por teste de tracionamento a quente. O aumento da variação do nível de metal no molde é um fator que contribui para o aparecimento de trincas transversais. A curvatura dos rolos provocada pelos seus desgastes ou excentricidade dos mesmos assim como o desalinhamento dos rolos pode exacerbar as trincas transversais. A propagação das trincas geradas no molde pode ser reduzida pela otimização da conicidade do molde nas faces estreitas do mesmo. Este tipo de defeito ocorre em todos os intervalos de temperatura de fragilização (T) a qual encontra-se o aço e cada intervalo é analisado separadamente, onde a temperatura liquidus do aço é representada por T_l .

3.9.1. Estudo das trincas transversais no intervalo de temperatura I: $1200^{\circ}\text{C} < T < T_l$

Estudo das trincas transversais no intervalo de temperatura compreendido entre $1200^{\circ}\text{C} < T < T_l$. Quanto à composição química aços do tipo mais aderentes, ou seja, com potencial ferrítico menor que 1,05, Wolf et al (1991), tendem a trincamento no menisco, pois a casca solidificada apresentam uma matriz ferrítica grosseira ou em caso de matriz austenítica uma redução da fração sólida. Também existe um aumento da microsegregação de elementos que diminuem abruptamente a temperatura solidus, tais como B, P, S. Uma pobre lubrificação do molde pode provocar trincamento devido ao tensionamento pela aderência do molde, principalmente se a oscilação do molde for alta. Em relação à aderência a escória deve ser de baixa viscosidade e solidificação vítrea, então se pode selecionar o tipo de pó lubrificante, Sorimachi et al (1982), ou em caso do uso de óleo como lubrificante pode-se adotar uma vibração ultra-sônica do molde. Aços sem tendência a aderência podem aderir se houver um enriquecimento local de carbono, então um pó lubrificante não deve ter um conteúdo de carbono livre entre 1,5-5%, segundo estudo de Schwerdtfeger et al (1994).

3.9.2. Estudo das trincas transversais no intervalo de temperatura II: $900^{\circ}\text{C} < T < 1200^{\circ}\text{C}$

Neste intervalo as trincas podem surgir na profundidade das marcas de oscilação ou das depressões, devido ao engrossamento do grão a alta temperatura, seguindo um caminho intergranular. Todas as trincas transversais situadas nas marcas de oscilação iniciam no molde, enquanto que outras condições como resfriamento secundário apenas propagam a trinca. As trincas situadas nas depressões tem como consequência à falta de penetração da escória líquida e quando ocorrem próximo a saída do molde podem até causar o rompimento da casca solidificada. Em todos os casos de trincas no referido intervalo de temperatura a coincidência com pronunciadas depressões é óbvia, portanto para aços sucessíveis a deformação no menisco um suave resfriamento é recomendado e permite posteriormente um mais intenso resfriamento secundário, mas deve-se atentar para o fato de que uma excessiva intensidade de resfriamento secundário origina trincas transversais na borda e próximo a ela.

3.9.3. Estudo das trincas transversais no intervalo de temperatura III: $600^{\circ}\text{C} < T < 900^{\circ}\text{C}$

A causa primária para ocorrência de trincas neste intervalo é tida como uma local fragilização devida à formação de precipitados, tais como AlN e NbC, nos contornos austeníticos de grão induzidas pelo tensionamento da região próxima a superfície. Um excessivo resfriamento secundário aliado a um amplo ciclo de temperatura acelera a formação de precipitados e aumenta o tensionamento térmico, respectivamente, portanto é recomendado um suave resfriamento secundário apenas no lado do bloco onde há maior tensionamento.

4. CONCLUSÕES

- (1) A compreensão dos fenômenos ocorridos no molde que geram os defeitos bem como as variáveis influentes são essências para construir um sistema especialista inteligente;
- (2) As investigações do molde revelaram que há uma forte correlação entre as temperaturas medidas na parede do molde e o controle da geração de defeitos no mesmo;
- (3) Os sistemas especialistas são métodos eficientes de detecção de defeitos;

(4) A construção de uma base de dados com grande abrangência de defeitos requer um grande volume de informações e deve ser estrategicamente iniciada com o estudo do molde visto que nele são gerados a maioria dos defeitos.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro.

6. REFERÊNCIAS

Brimacombe, J.K.,1997, “Empowerment with knowledge – toward the intelligent mould for the continuous casting of steel billets”. Early Continuous Casting, Vol 9, “Initial Solidification and strand surface quality of pritectic steels”, Iron & Steel Society.

Cheung, N. et al, 2001, “The use of a heuristic search technique for the optimization of quality of steel billets produced by continuous casting”. Engineering Applications of Artificial Intelligence Vol. 14.

Saucedo, I. G., 1997, Continuous Casting – Vol. 9 “Initial Solidification and strand surface quality of pritectic steels”, Iron & Steel Society.

Pinheiro, C. A. M. et al, 2000, “Mould heat trasfer and continuously cast billet quality with mould flux lubrication Part 2 Questões de qualidade” Ironmaking and Steelmaking, Vol 27, No. 2.

Wang, B. et al, 2000, “Shell Growth, surface quality and mould taper design for high-speed casting of stainless steel billets”, Canadian Metallurgical Quarteely, Vol 39, No. 4.

Kuwano, T. et al, 1983, “ Metallurgical problems encountered in continuous casting of stainless steels, Ironmaking and Steelmaking, Vol. 10, No. 2.

Brian, T. et al, 1997, “Simulation of longitudinal off-corner depressions in continuously cast steel slabs”, “Continuous Casting – Vol. 9, “Initial Solidification and strand surface quality of pritectic steels”, Iron & Steel Society.

Fujiyama, T. et al, 1997, “Production of continuous casting slabs free from surface crack”, “Continuous Casting – Vol. 9, “Initial Solidification and strand surface quality of pritectic steels”, Iron & Steel Society.

Wolf, M. M. et al, 1991, “Estimation of crack susceptibility for new steel grades”, Proceedings 1 st European Conference on Continuous Casting – Vol. 2.

Sorimachi, K. et al, 1982, “Influence of mould powder on breakout causad by sticking”, Fachberichte Hüttenpraxis Metallweiterverarbeitung, Vol. 20.

Schwerdtfeger, K. et al, 1994, Oxidation of carbon and dissociation of carbonate during the heating of mould powders”

DEVELOPMENT OF THE STRUCTURE OF A DATA BASE FOR A SPECIALIST SYSTEM OF DEFECTS DIAGNOSIS OBSERVED IN THE CONTINUOUS CASTING PRODUCTS

Marcos Heleno Anton

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Edir dos Santos Alves

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

***Abstract:** About 80% of the steel consumed around the world is produced by continuous casting process. In spite of the technology to have more than 30 years, this still present a lot of deficiencies mainly in the formation of defects. Several researchers have been studying the solidification and the defects along the processing, and now numeric models has been aiding in the understanding of the heat transfer of the process. With the progress of the computer science and eventually processing systems faster, it becomes necessary the investment in new systems which are capable to process different types of defects observing inside the process. It will allow diagnosing and suggesting physical modifications in the equipment to optimize the quality of the products. The present work develops a fundamental structure for the project of a database, which identifies through information obtained in a numeric simulation, possibilities to avoid defect formation in the continuous casting process products. Statistic tests prove the efficiency of the developed structure, allowing this to be applied in a specialist system programming.*

***Key words:** Continuous casting, defects, database, expert system.*