

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FEI
AMILTON SILVA DE MORAES**

MANEIRAS DE CONTROLAR O HIDROGÊNIO NO PROCESSO SIDERÚRGICO

São Paulo

2009

AMILTON SILVA DE MORAES

MANEIRAS DE CONTROLAR O HIDROGÊNIO NO PROCESSO SIDERÚRGICO

Monografia apresentada ao Centro Universitário da FEI, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de pós-graduação LATO SENSU em metalurgia com ênfase em siderurgia, orientado pelo Prof. Antonio Augusto Gorni

São Paulo

2009

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus por permitir condições necessárias como saúde, bem estar e persistência a conclusão deste curso.

Agradeço ao Gerente de chapas grossas da Usiminas Cubatão, Engenheiro Dilson Mauro de Moraes pelo incentivo e apoio durante o transcorrer deste curso.

Agradeço ao meu professor orientador, Dr. Antonio Augusto Gorni pela sua experiência a mim transmitida e pela sua disposição em poder esclarecer sobre o assunto proposto desta monografia.

Agradeço a todos os professores do curso a dedicação na preparação das aulas, exercícios e os conhecimentos transmitidos em todas as aulas, em especial aos Professores Cyro Takano e Rodrigo Magnobosco pela ajuda nas soluções de problemas e pelo tempo de vossa atenção.

Agradeço aos meus colegas de classe e em especial dado pelo aluno Flávio Antonio Lima pela sua técnica de incentivar pessoas e me ajudar com este assunto.

Agradeço a minha família em nome da minha esposa Simone Bassualdo Bento de Moraes por ter incentivado e acreditado nos meus estudos.

RESUMO

Devido um aumento de demanda na produção nos aços de alta resistência e grande dificuldade de logística na linha de chapas grossas da Usiminas Cubatão, surgiu a idéia de descrever os cuidados que devemos ter no controle do hidrogênio no processo siderúrgico de uma usina integrada. A monografia visa mostrar a importância do controle na produção do aço desde o seu processo inicial até o final, com medidas em que possam amenizar as dificuldades existentes após a laminação, quando o aço já está sólido, e as atividades para eliminar hidrogênio ficam mais difíceis, gerando um enorme transtorno quanto a métodos utilizados, e descreve as principais formas para este controle.

Palavras- chave: Aço- Hidrogênio - controle

ABSTRACT

Due to a production increase of high resistance steel plates and the great logistical difficulties associated with de- hydrogenation treatment at the plate mill line of Usiminas-Cubatão, it is necessary to review the appropriate measures to be adopted aminc hydrogen control along the steel plate production chain. The emphasis of this works was to ease the plate finishing process, suggesting countermeasures for hydrogen control before steel solidification, as the solid state de- hydrogenation is far more difficult than those applied to liquid steel. The main forms of hydrogen control were also described.

Keywords: Steel - Hydrogen - control

LISTA DE TABELAS

Quadro 1 – Composição média do aço líquido na Usiminas Cubatão.....	12
Quadro 2 – Especificação da escória sintética sinterizada.....	26
Quadro 3 – Efeito da adição de coque no teor de hidrogênio do aço líquido	27
Quadro 4 – Resultado do teor de hidrogênio nas rotas do refino secundário.....	29
Quadro 5 – Resultado de chapas empilhadas a quente.....	33

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Detalhes de um alto forno.....	10
Figura 2 – Processo de produção da aciaria da Usiminas.....	11
Figura 3 – Fluxo da produção da laminação a quente Usiminas.....	13
Figura 4 – Fluxo de produção laminação a frio Usiminas.....	14
Figura 5 – Solubilidade do hidrogênio em função dos elementos de ligas e temperatura a pressão de 1 atm e a 1600° C.....	16
Figura 6 – Hidrogênio na ferrita; hidrogênio na perlita.....	16
Figura 7 – A cal influenciando o hidrogênio.....	17
Figura 8 – Infiltração do hidrogênio nos grãos do aço.....	18
Figura 9 – Micro trincas provocada pelo hidrogênio.....	18
Figura 10 – Fatores influenciando para a avaliação de um material ou componente sensibilidade para hidrogênio.....	19
Figura 11 – Defeitos provocados por hidrogênio.....	20
Figura 12 – Equipamento Hydris.....	21
Figura 13 – Esquema do principio da medição.....	22
Figura 14 – Molde de cobre e amostra retirada do aço.....	23
Figura 15 – Ilustração de um preenchimento ferrostático.....	23
Figura 16 – Amostradores e amostra retirada do aço liquido.....	24
Figura 17 – Aspecto de uma amostra onde as manchas brancas correspondem ao H ₂ , após o teste.....	24
Figura 18 – Principais Partículas.....	25
Figura 19 – Escória sintética.....	26
Figura 20 – Estrutura do Modelo de Processo a Vácuo.....	28
Figura 21 – Experiência de tempo no desgaseificador.....	30
Figura 22 – Processo de lingotamento continuo com laminação intermediária.....	31
Figura 23 – Resultado do teor de hidrogênio com redução da placa.....	32
Figura 24 – Diagrama para resfriamento estratégico na laminação.....	33
Figura 25 – Local de empilhamento de chapas a quente.....	34
Figura 26 – Ponte rolante retirando e colocando chapas do empilhamento.....	35

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	09
1. FLUXOS RESUMIDOS DA PRODUÇÃO DE AÇO EM UMA USINA INTEGRADA.....	10
2. HIDROGENIO NO AÇO	15
2.1. Surgimento do hidrogênio no aço	15
2.2. Danos do hidrogênio no aço.....	18
2.3. Medições do hidrogênio no aço.....	21
2.4. Redução do teor de hidrogênio no aço.....	25
3. CONCLUSÃO	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38
ANEXOS	41

INTRODUÇÃO

A fragilização do aço pelo hidrogênio é um fenômeno que ocorre devido à incorporação e retenção deste gás acima de limites toleráveis, que gera altíssimas tensões internas e diminui drasticamente a capacidade de deformação.

Cada vez mais a procura por aços especiais vem aumentando, e com isto a necessidade de eliminarmos os elementos nocivos a eles, um dos principais é o hidrogênio, menores teores desse elemento levam a maior homogeneidade das propriedades mecânicas e menor preocupação nos processos seguintes de uma usina de aço integrada,

Hoje sabemos que o mundo se preocupa muito com isto, mas ainda não está como umas das principais preocupações na siderurgia brasileira onde algumas preferem o retrabalho mesmo sabendo das possíveis perdas e as vezes comprometendo o seu próprio resultado.

Detalhadamente este trabalho pesquisou através de vários autores, como surge, os danos e formas de contermos uma boa amenização deste nocivo no aço dando sugestões para alcançar um excelente nível de (ppm) deste gás no interior do produto através de vários controles, envolvendo todo processo de produção em uma usina de aço integrada.

1. FLUXOS RESUMIDOS DA PRODUÇÃO DE AÇO EM UMA USINA INTEGRADA

A maioria das usinas siderúrgicas divide-se o processo de produção em área que denominamos de redução, aciaria e laminações.

Na redução começamos com a matéria prima que tem o minério de ferro como seu principal elemento para a produção do gusa líquido.

Através de correias transportadoras o Alto forno é abastecido pelo topo com os minérios de ferro, calcário e coque que por correntes de ar quente vinda de baixo do forno ocorre uma série de reações no que provoca redução do minério de ferro até a chegada de obtermos o gusa líquido, tendo a sua natureza exata de reação: $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3 \text{CO} \rightarrow 2 \text{Fe} + 3\text{CO}_2$.

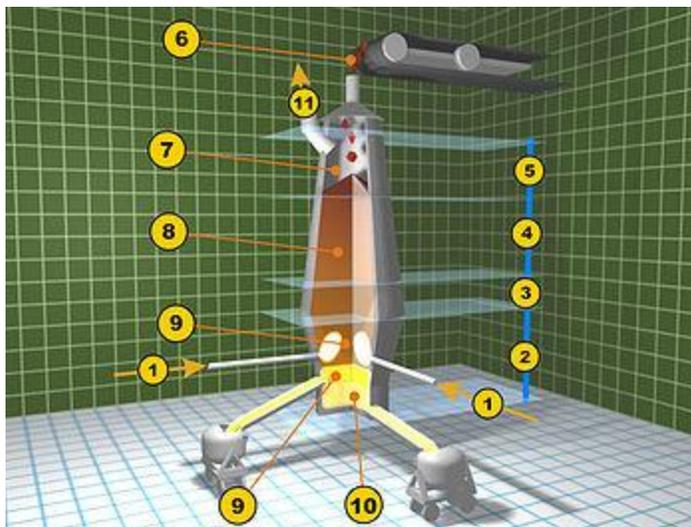


Figura 1: Detalhes de um alto forno

Fonte: Wikipédia, 2009¹

Esta redução cujo produto metálico é o gusa líquido é constituído em torno de 94% de ferro, 4% de carbono e o restante é composto com elementos como o silício, manganês, fósforo e enxofre.

¹ Fornalha Cowper; 2.zona de fusão; 3. zona de redução de óxido ferroso; 4.zona de redução de óxido férrico; 5.zona de pré-aquecimento (garganta); 6. alimentação de minério, pedra calcária e coque siderúrgico; 7. escapamento de gases; 8. coluna de minério, coque e pedra calcária; 9. remoção de escória; 10. ferro-gusa; 11. Chaminé para escoamento dos gases liberados

Neste processo obtém outro líquido a escória que é formada principalmente pela ganga do minério de ferro (SiO_2 , Al_2O_3), pelos fundentes (CaO , MgO) e pelas cinzas do coque.

Na redução além do alto forno existem vários outros equipamentos para o auxílio e facilitação deste processo como:

Coqueria: são baterias de fornos onde o carvão mineral após um aquecimento se transforma em coque e gás de coqueria e tem como função principal fornecer o calor necessário as necessidades térmicas do alto forno.

Sinterização: processo onde aglomeramos o minério de ferro gerando o Sínter a matéria prima para o alto forno produzir ferro gusa.

Após a saída do gusa líquido do alto forno ele é destinado à aciaria através de carros torpedos onde a uma temperatura aproximada de 1450°C ele começa a ter todo processo para transformar em aço. Como mostra a figura abaixo:

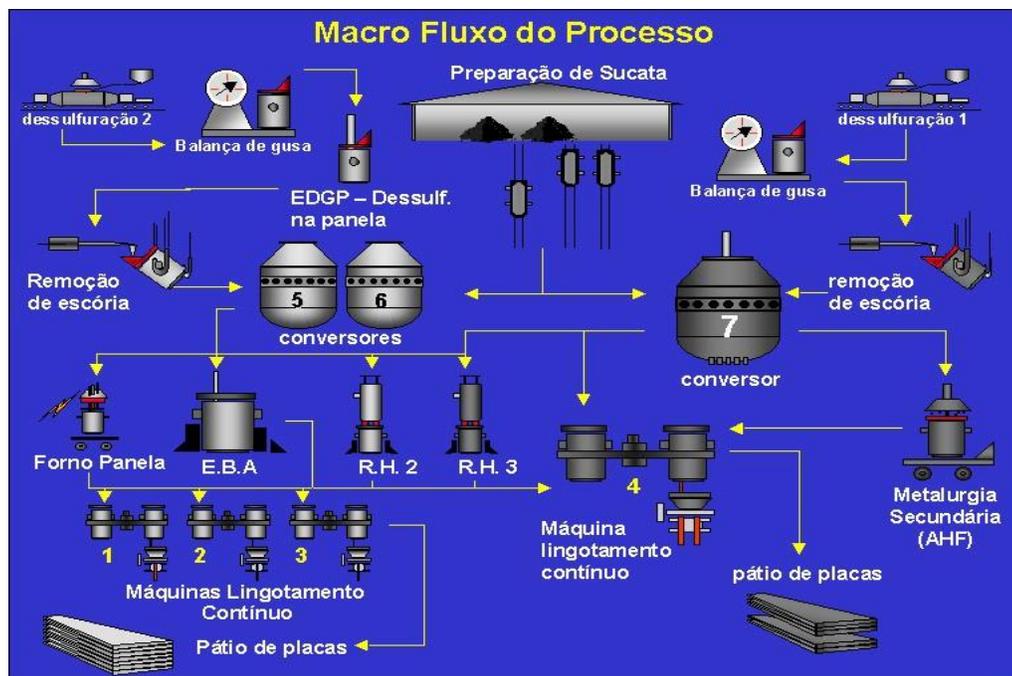


Figura 2: Processo de produção da aciaria da Usiminas

Fonte: Intranet Usiminas, 2009

Nos processos da aciaria, é nos conversores ou convertedores como é chamado por alguns autores é que começamos a definir que tipo de aço está sendo originado, com lança soprando oxigênio e mais adições de sucata e escorificantes obtemos o refino do gusa.

Neste momento a temperatura média do banho chega a 1650°C e começamos a definir o aço que fica em média com sua composição química:

Tabela 1: Composição média do aço líquido na Usiminas Cubatão

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)				
C	Mn	Si	P	S
0,054	0,156	0,003	0,0156	0,0084

Fonte: Intranet Usiminas, 2009

Para chegarmos à composição final do aço, durante o seu vazamento para uma panela adicionamos ferro ligas, desoxidantes e escorificantes e logo em seguida o aço pode tomar várias rotas, estação de borbulhamento de argônio para homogeneizar a temperatura e composição química, o forno panela onde pode ajustar a qualidade do aço com um pouco mais de precisão e o RH que é um tratamento do aço sob vácuo, um dos controles de hidrogênio no aço que iremos detalhar na continuação deste trabalho.

Após estas etapas de refino secundário o aço está pronto para ser solidificado, tendo o lingotamento à próxima fase deste processo, no lingotamento contínuo o mais usado e eficiente dos tempos atuais sai como resultado o produto semi-acabado que no caso da Usiminas Cubatão são as placas onde terá a sua continuação no processo de laminação.

Na laminação a quente o objetivo é transformar placas de aço em chapas grossas ou bobinas a quente, as placas de aço vinda da aciaria após o reaquecimento em fornos são laminadas dando, portanto, o produto final ou podendo ser direcionado para laminação a frio no caso das bobinas.

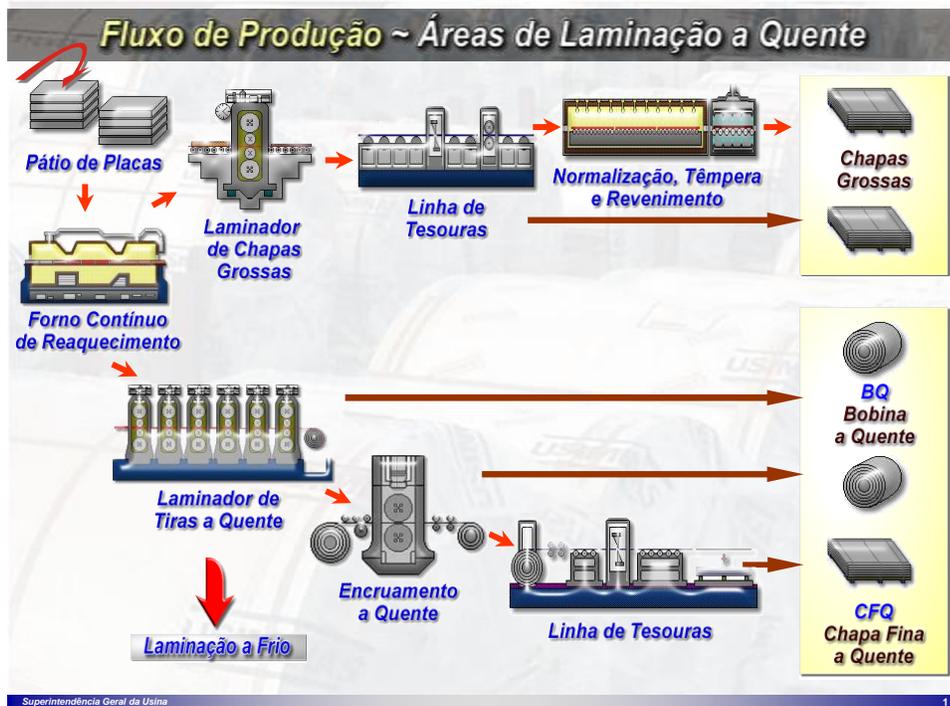


Figura 3: Fluxo da produção da laminação a quente Usiminas

Fonte: Intranet Usiminas, 2009

Na laminação de chapas grossas as placas de aço, com espessura entre 210 e 260 mm, são aquecidas nos Fornos de Reaquecimento até 1200°C, após o aquecimento são processadas num laminador quádruplo reversível até atingirem espessuras entre 6,0 e 150 mm, conforme o produto desejado pelo cliente. A largura máxima desse material varia entre 1.150 e 3.850 mm.

Na laminação de tiras a quente as placas de aço são aquecidas nos Fornos de Reaquecimento até 1250°C, esboçadas em duas cadeiras reversíveis e processadas num Trem Acabador Contínuo com seis cadeiras, assumindo então espessuras entre 2,0 e 12,7 mm, conforme o produto desejado pelo cliente. A largura desse material varia entre 1.075 e 1.570 mm.

Nos casos das bobinas tendo este produto ainda não como final eles são encaminhados para a laminação a frio com o intuito de fazer um melhor acabamento nas bobinas a quente, através do processo físico-químico transformando-as em chapas finas a frio ou bobinas a frio, através de suas fábricas.

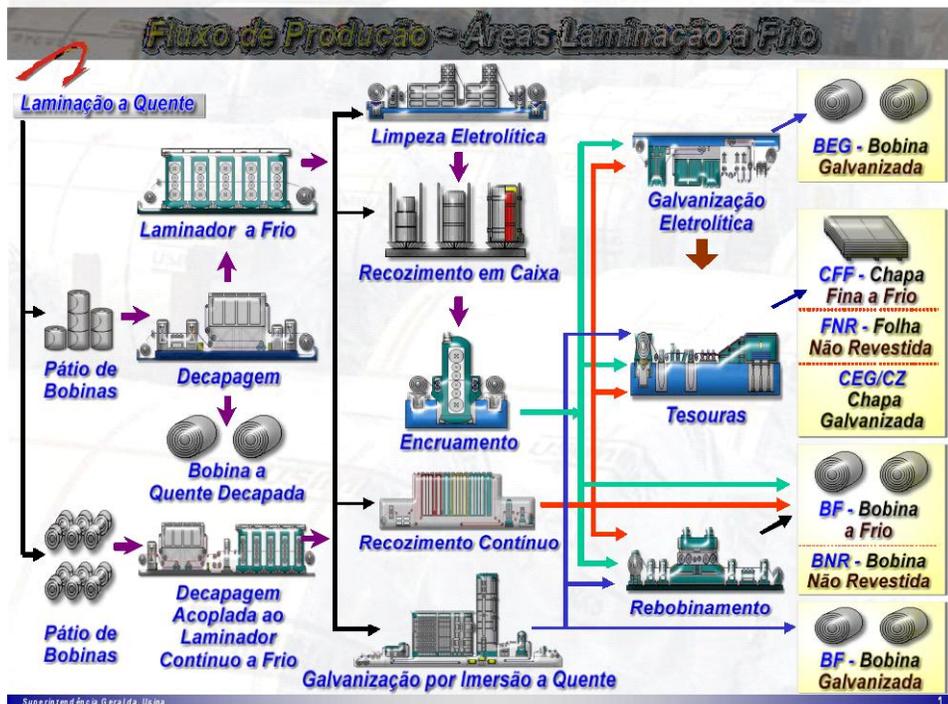


Figura 4: Fluxo de produção laminação a frio Usiminas

Fonte: Intranet Usiminas,2009

Decapagens têm a finalidade de remover a camada de óxido sobre a tira laminada para que possam ser passada no laminador de tiras a frio que é o principal equipamento na linha de produção de laminados a frio, possui como função reduzir a espessura da tira de acordo com o especificado, com acabamento superficial e planicidade adequadas.

A linha de Recozimento da é constituída por baterias de fornos “em caixa” que utilizam como combustível gás natural, que tem como finalidade desta etapa do processo recuperar e adequar as propriedades mecânicas do material para atender às especificações dos clientes através de tratamento térmico.

O processo de encruamento consiste no ajuste de forma e acerto das propriedades mecânicas através de um leve passe dado no laminador de encruamento, em algumas laminações a frio existem também outros processos, a galvanização tem como objetivo proteger uma peça de metal da corrosão, bem como conferir melhor acabamento estético ou decorativo à mesma, o acabamento final é constituído pela linha de inspeção, tesouras e bobinamento, quase todo o material da laminação a frio é destinado para linha branca e setor automotivo.

2. HIDROGÊNIO NO AÇO.

2.1 SURGIMENTOS DO HIDROGÊNIO NO AÇO

Hidrogênio existe e está presente em quase toda parte, no interior e acima da terra, e Johnson (1875) foi um dos primeiros que notou algumas mudanças com efeitos danosos correlacionadas à presença do hidrogênio no ferro e aço.

Conforme definição de Carter (2001) o hidrogênio é o elemento menor e mais leve da tabela periódica, consistindo na sua forma atômica em um próton e um elétron simplesmente. Na natureza é encontrado em sua forma molecular H_2 . Por ser tão pequeno, tem uma relativa boa mobilidade (difusão) em metais principalmente na sua forma atômica, quando alojado intersticialmente no metal.

Para Dorigon (2003), o hidrogênio é incorporado no aço devido a uma atmosfera rica em umidade, através de escórias sintéticas que serve como proteção do revestimento das panelas, presença de água nas escórias, adição de ligas úmidas entre outros.

Todos os materiais que entram em contato com o aço líquido tem certa solubilidade para o hidrogênio, contato com o ambiente úmido através de materiais refratários e a escória são os mais facilitadores para estas inclusões, em certas ocasiões o hidrogênio pode ser aumentado pela absorção e difusão do hidrogênio atômico na superfície do metal através de uma reação de corrosão (OSTA ET AL 2007).

Para Dorigon (2003), o hidrogênio surge nos aços carbono com baixa liga e de alta resistência à tração, ele no estado atômico tem o seu surgimento formado pelo próprio metal que em contato com estruturas de metais mais leves como é o caso do alumínio ocorre uma corrosão anódica de sua camada, e também pelos processos como a decapagem, desengraxe catódico ou eletroposição.

Outro fator crucial ao surgimento e aumento do hidrogênio no aço líquido, é o que descreve Fujii, et al (2003), a temperatura, mais alguns elementos dissolvidos no aço influenciam a solubilidade do hidrogênio, tendo o titânio, vanádio, cromo e manganês elementos que aumentam solubilidade, já o carbono, boro, silício e alumínio diminuem solubilidade.

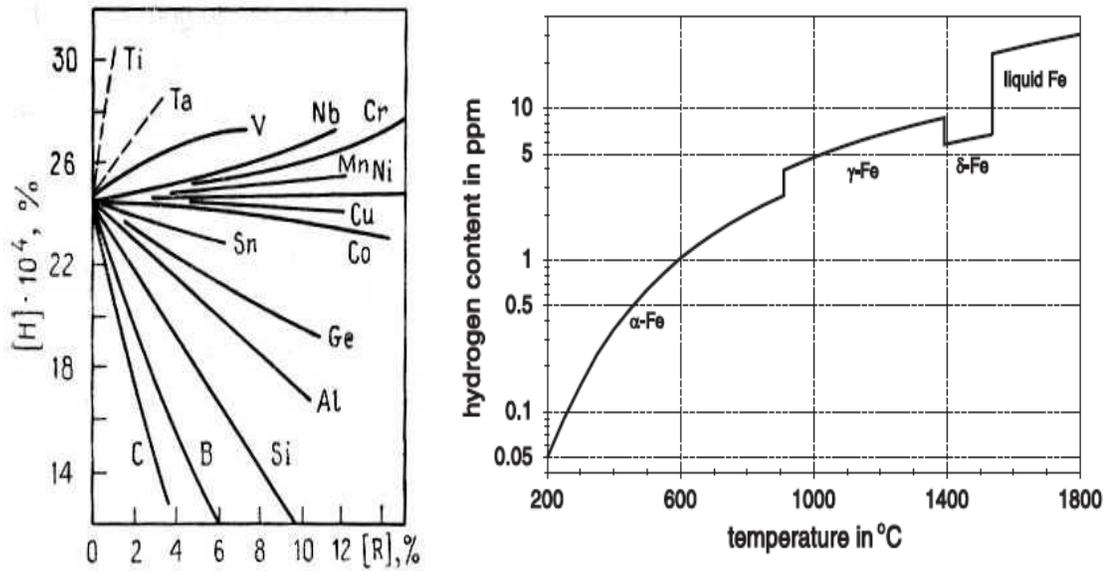


Figura 5: Mostra a solubilidade do hidrogênio em função dos elementos de ligas e temperatura a pressão de 1 atm e a 1600° C

Fonte: artigo de Fujii et al, 2003

Conforme Brandaleze et al (2004): a temperatura exerce uma influência no mecanismo de difusão e captura de hidrogênio tanto como na dissolução do mesmo no aço, o acúmulo de hidrogênio em algumas barras de aço estudadas permitiu visualizar claramente a influência da cinética de resfriamento onde o hidrogênio ficou acumulado em zonas da barras de aço, na ferrita o hidrogênio possui maior proporção do que na perlita, como mostra a figura abaixo o hidrogênio nos pontos brancos:

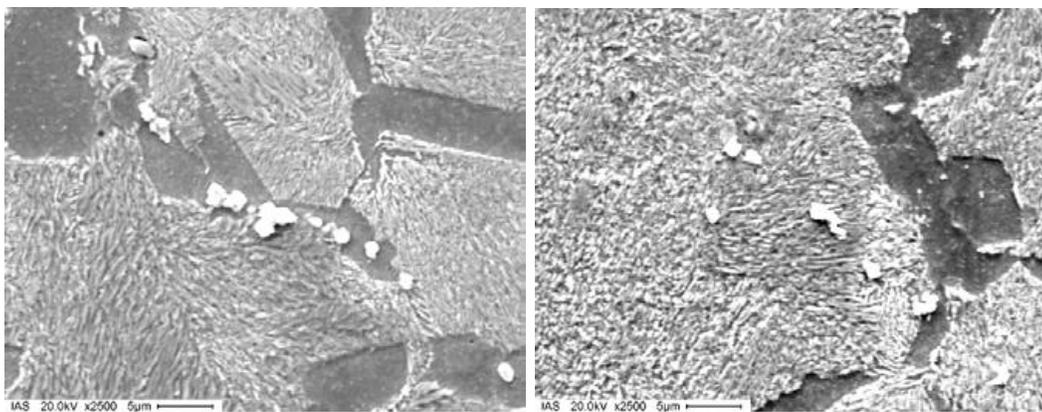


Figura 6: Hidrogênio na ferrita

hidrogênio na perlita

Fonte: Brandalese et al, 2004

Oliveira (2002) em sua apresentação de tese, definiu que o hidrogênio é um elemento químico muito pequeno que pode ser encontrado em solução sólida na estrutura cristalina dos metais, capaz de permear os metais produzindo fragilização e move-se por difusão com facilidade.

Junker et al (2005) confirmou que o teor hidrogênio aumenta com adições de cal na escória e de (CaSi) para o tratamento do aço, na figura abaixo mostra a cal na panela e injeção de CaSi indicando um aumento do hidrogênio.

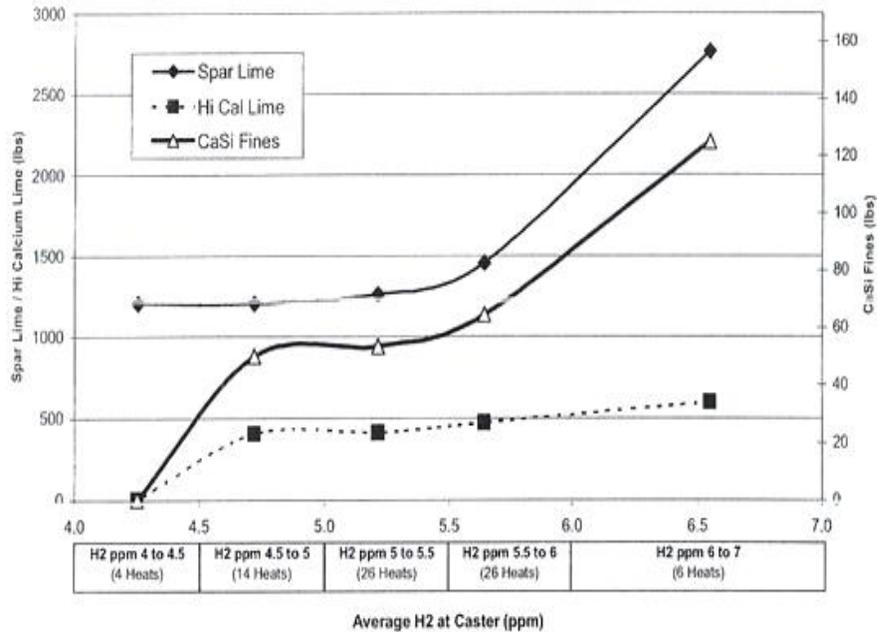


Figura 7: A cal influenciando o hidrogênio
 Fonte junker,2005

Rodrigues (1994) relatou que o hidrogênio se difunde em materiais metálicos na forma protônica, liberando na estrutura do material um número de elétrons livres igual ao número de prótons difundidos, uma vez que cada átomo de hidrogênio contribui com um elétron livre.

Fialho et al (2005), também apresentou que durante o lingotamento contínuo o aço também pode ser contaminado pelo hidrogênio através da umidade do distribuidor e pelo pó de cobertura.

2.2 DANOS DO HIDROGÊNIO NO AÇO

Segundo Dorigon (2003), se o metal fragilizado por hidrogênio for submetido a ensaios mecânicos, testes de tração e tensões podem levar à ruptura prematura, isto em virtude da fratura provocada pelas bolhas, decarbonetação e o afrouxamento intergranular levando a fissuração entre os grãos.

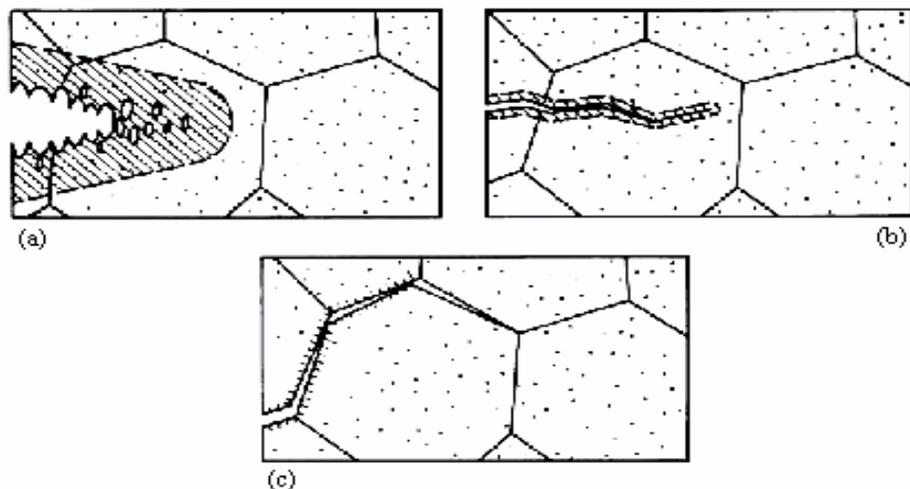


Figura 8: Infiltração do hidrogênio nos grãos do aço

Fonte Dorigon, 2003

Conforme Kato e Miranda (1986), pequena quantidade de hidrogênio no aço causa trincas tipo fio de cabelo, do tipo degrau, trincas retardadas e bolhas superficiais, este processo de nucleação das trincas dar-se devido o hidrogênio atômico se alojar nas regiões de interface formando moléculas,

Estruturas metálicas como plataformas marítimas, vasos de pressão, tubos para linhas de gás e petróleo têm que ter resistência a trincas induzidas pelo hidrogênio.

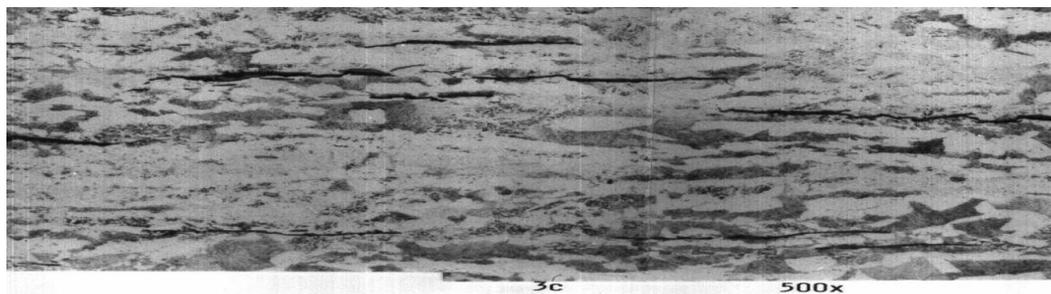


Figura 9: Micro trincas provocada pelo hidrogênio

Fonte Kato e Miranda, 2003

Para Oliveira e Miranda (2000), o acúmulo de hidrogênio em sítios enfraquece as ligações metálicas ocasionando trincas que se propagará ocorrendo fraturas nos componentes metálicos, tendo com resultados:

- Degradação das propriedades mecânicas dos aços.
- Redução da tenacidade à fratura.
- Diminuição da ductilidade a tração.

Na visão de Schwarz (2000):

O hidrogênio induz a separação de material e esta influência é evidenciada na área da deformação plástica, em caso de cargas estáticas de hidrogênio há uma redução de ductibilidade, enquanto nas cargas cíclicas há um aumento drástico na velocidade de propagação da rachadura ocorrendo fraturas e diminuição da dureza, isto é aparente nos aços austeníticos onde as propriedades de deformação plásticas são melhores.

Na figura abaixo temos uma explicação sobre a área que é suscetível ao hidrogênio.

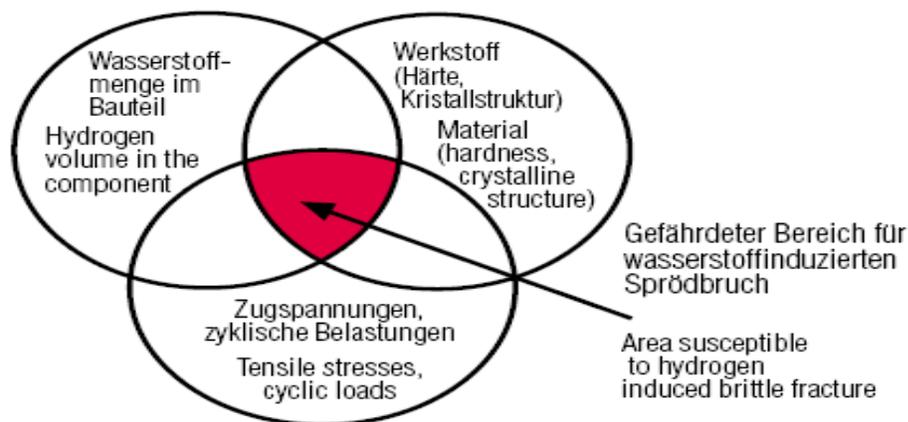


Figura 10: Fatores influenciando para a avaliação de um material ou componente quanto à sensibilidade para hidrogênio

Fonte: Schwarz, 2000

Para Brandaleze et al (2004) existem várias controversas quando se refere do hidrogênio nas propriedades dentre as quais podemos mencionar o tempo, o estado de tensão, a microestrutura do aço, a presença de gases e líquido, o meio ambiente, a concentração do hidrogênio no aço, a pressão, a temperatura, as propriedades físicas e mecânicas do material, condições superficiais, velocidade de difusão, a distância da fonte de hidrogênio, a natureza do movimento da trinca e os mecanismos da fratura.

Mas é certo que os tipos de danos podem comprometer todos os resultados provocando prejuízos como: geração de pequenos poros nas placas de aço solidificadas, fragilização e indução de fissuras e paradas no processo, interrompendo a produção contínua.

Pronsato et al (2001) definiu que pequena quantidade de átomos de hidrogênio presente em um material, pouca parte por milhão, podem causar uma perda importante nas propriedades mecânicas dos materiais pela propagação de trincas e corrosão. As conseqüências podem comprometer a produção, inclui a falha estrutural, a diminuição da vida de um componente em serviço ou a necessidade prematura de reparos. Para Valadares et al (2005) com a presença de hidrogênio no aço, após a solidificação formam defeitos que são de forma tubular localizados na superfície das placas, podendo ter diâmetro de até 3 mm e comprimento de 25 mm.

Quando abertos na superfície podem sofrer oxidação. Desta forma podem gerar bolhas ou escamas no produto laminado. Este defeito pode ser formado pela geração de CO ou H₂, decorrente da diminuição da solubilidade do C, O e H do aço ocorrendo às vezes corte e sucateamento das placas devido este defeito

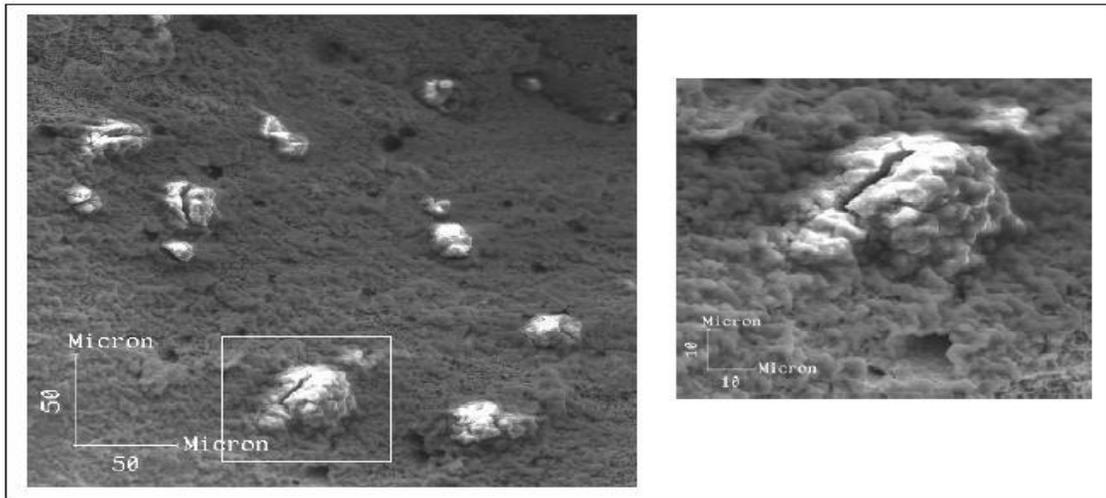


Figura 11: Defeitos provocados por hidrogênio

Fonte Valadares, 2005

2.3 MEDIÇÕES DO HIDROGENIO NO AÇO

Existem várias formas de medir o teor do hidrogênio no aço. O que se busca hoje é uma forma que dê o resultado mais rápido possível, para que o fluxo da produção em uma usina integrada siga de forma que garanta uma boa qualidade interna do aço como evite vários retrabalhos.

Uma das principais é o sistema Hydris®, que converte o sinal de detector de condutividade térmica, analisando a concentração de hidrogênio pelo gás de nitrogênio os resultados são fornecidos on-line dando o diagnóstico imediato de como o aço líquido está carregado de hidrogênio,

Ele é composto de uma sub-lança com um sensor em sua ponta capaz de definir com precisão o teor de hidrogênio, portanto não há necessidade de retirada de amostras, melhorando o controle de processos direto na produção do aço.

O sensor descartável Hydris® consiste principalmente de um tubo de quartzo, tijolo poroso, câmara de filtro e um conector. O qual possui projeto especial para criar uma conexão sólida e hermética entre sonda e lança.



Figura 12: Equipamento Hydris

Fonte: Eletro-nite, 2009

Hydris é um sistema on-line que foi desenvolvido pela empresa Electro-Nite na Filadélfia com o intuito de em curto espaço de tempo fornecer e obter informações precisas para uma rápida tomada de decisão.

Este sistema funciona da seguinte forma, o nitrogênio é injetado no aço líquido e recirculado entre o aço e uma unidade pneumática, o nitrogênio absorve o hidrogênio durante esta passagem na unidade pneumática, quando chega ao equilíbrio do hidrogênio no aço líquido e o equilíbrio do hidrogênio no nitrogênio a medição é dada por completa.

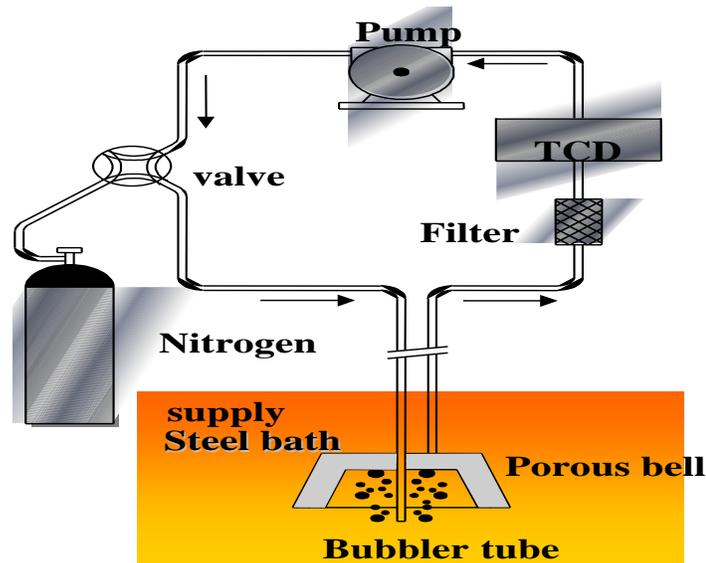


Figura 13: Esquema do princípio da medição

Fonte: Nunes, 2008

O sistema Hydris mede a pressão parcial de hidrogênio no aço líquido. A partir do valor da pressão obtém o valor de hidrogênio no metal líquido conforme equação abaixo:

$$H(\text{ppm}) = \frac{K_H}{f_H} \times \sqrt{PH_2}$$

Onde:

H é o teor de hidrogênio no aço em ppm;

K é a constante de equilíbrio da reação de dissociação de hidrogênio gasoso no aço Líquido;

f é um fator de correção do teor que depende dos elementos de liga presentes.

Existem várias outras maneiras de medir o teor de hidrogênio no aço, mas requer retirada de amostras, resfriamento e transporte até o laboratório em gelo seco ou nitrogênio líquido para evitar a difusão de hidrogênio até a análise, ocasionando demora para dar um resultado final.

Amostragem do aço com colher requer um cuidado enorme no manuseio desta atividade que consiste em colocar o aço líquido em um molde de cobre que após a solidificação é resfriada com água.

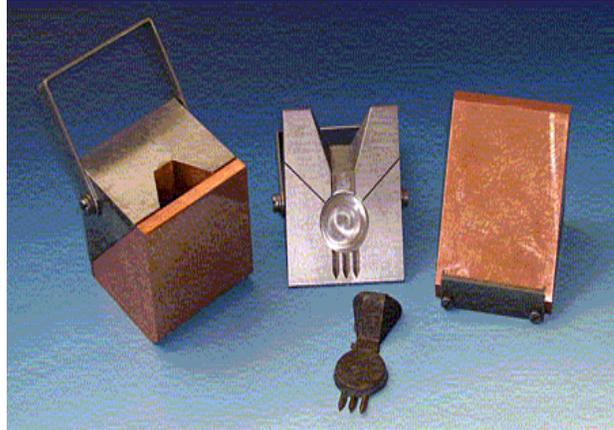


Figura 14: Molde de cobre e amostra retirada do aço

Fonte: Nunes, 2008.

Na amostragem com preenchimento ferrostático também tem quase a mesma definição, porém é feito de forma em que um amostrador de metal em forma de tubo sendo quartzo ou pirex é imerso no aço líquido e é preenchido por pressão ferrostática.

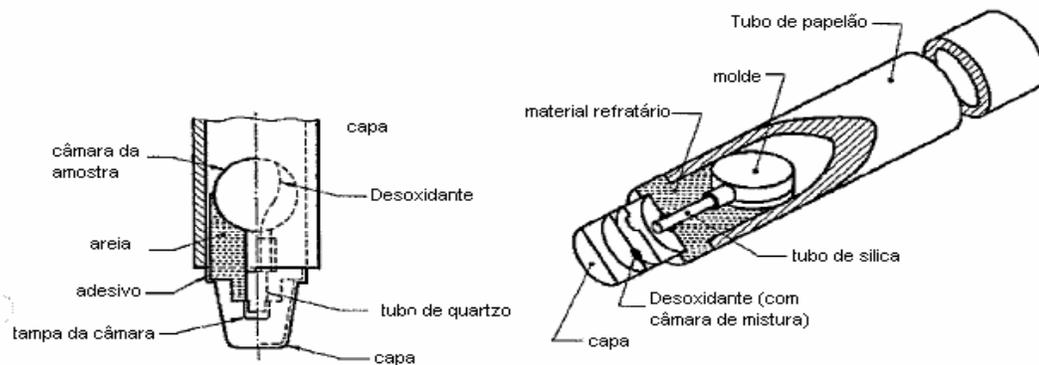


Figura 15: Ilustração de um preenchimento ferrostático

Fonte: Peixoto, 2007.

Existe também o método com preenchimento a vácuo onde um amostrador em forma de tubo é inserido no aço líquido.



Figura 16: Amostradores e amostra retirada do aço líquido

Fonte 16: Nunes 2008

Existem outros vários testes e avanços tecnológicos já apresentados em seminários, conferencias etc., e o que iremos comentar a seguinte é o um método novo apresentado no 15th IAS Steelmaking Conference, 2005, San Nicolas, Argentina.

Onde Brandeize et al (2004) apresentou uma técnica que mediante um emprego de um reagente químico a base de um sal de prata é possível determinar o hidrogênio no material.

A solução de sal prateado em presença com hidrogênio ocorre uma redução de íons e cristais de prata metálica indicando os sítios onde o hidrogênio está localizado.

Foi comprovada esta técnica após submeter uma amostra de aço sólido enriquecida de hidrogênio em uma solução (SO_4H_2 0,1 N), mantendo uma corrente entre 10 e 100 mA/cm² durante 16 minutos e uma temperatura de 20°C do sistema, em seguida se introduz a solução de sal prateado. O resultado mostrado na figura abaixo indica que as partículas brancas correspondem a cristais de prata localizados em sítios onde há presença de hidrogênio.

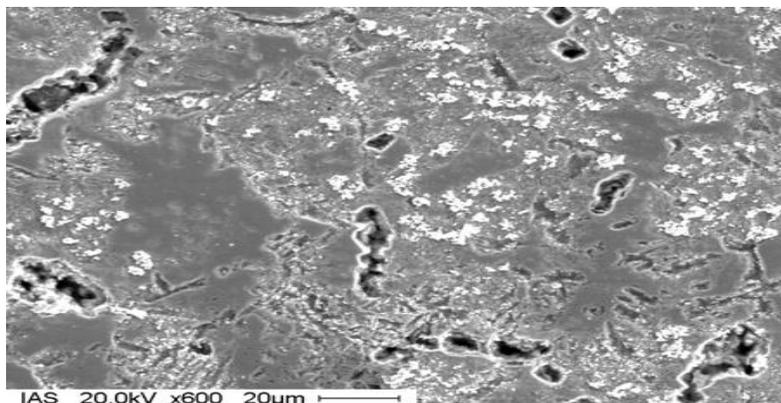


Figura 17: Aspecto de uma amostra onde as manchas brancas correspondem ao H₂ após o teste.

Fonte: Brandeize, 2004.

Esta técnica também é possível determinar a distribuição do hidrogênio nos elementos como o S, Mn e partículas de Ag presentes.

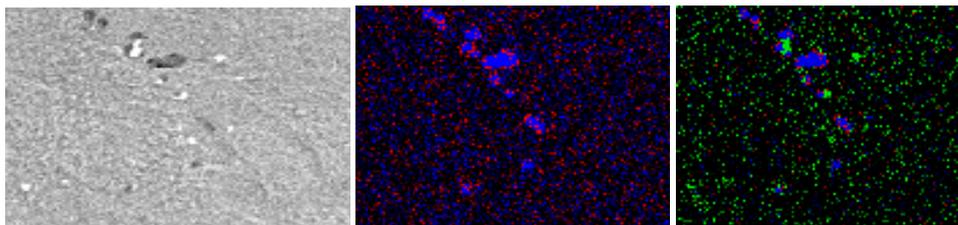


Figura 18: Principais Partículas

Fonte: Brandeleza, 2004²

Estes resultados não só permite localizar o hidrogênio no material como indicar que tipo de medidas pode ser tomado para corrigir e controlar os problemas relacionados ao hidrogênio.

2.4 REDUÇÃO DO TEOR DE HIDROGENIO NO AÇO

A prevenção e cuidados com os materiais usado no refino secundário são essenciais para evitar a introdução de hidrogênio no aço líquido.

De acordo com Bomm (1994) para obtermos valores baixos de hidrogênio no momento do sopro é inevitável o controle da umidade do minério de ferro e de cal, como evitar qualquer tipo de vazamento de água dentro do conversor.

Para trabalhar de forma preventiva é recomendado segundo vários autores:

- Utilizar sempre adições secas, manter sempre cobertos os fundentes, cal e elementos de liga, evitando a umidade destes materiais no processo de refino.
- Sempre que adicionar materiais, procurar jogar no começo do sopro com o objetivo do gás CO eliminar o hidrogênio proveniente de uma possível umidade.
- Todos os equipamentos ou componente da panela que entrem em contato com o aço líquido devem ser aquecidos.
- Fazer o possível para impedir a passagem de escoria do forno para a panela, com o intuito de diminuir a utilização de cal.

² Partículas de Ag ligadas a Mn,S; S (roxo), Mn (azul); (roxo), Mn (azul) e Ag (verde)

- Controlar a alta temperatura do aço líquido.
- Manter refratários aquecidos.
- Minimizar o tempo de estocagem da cal e sempre manter em recipientes herméticos.

Conforme Santos et al (2009) uma solução com o intuito de substituir a cal calcítica que é umas das grandes fontes de hidrogênio no aço, foi desenvolvido pela Tecnosulfur a escoria sintética sinterizada que tem como características físicas e químicas não incorporar hidrogênio e com composição balanceada ainda permite uma boa limpidez interna no aço.

Esta escoria sintética atende os requisitos do processo e mantém o desempenho operacional, tendo em sua fórmula química:

Tabela 2: Especificação da escória sintética sinterizada

CaO	MgO	CaF₂
52% min.	8 ~ 12%	12 ~ 16%

Fonte: Santos 2009

Com temperatura, pressões e vazões controladas em uma planta de sinter é capaz de fazer aglomeração das partículas através do aquecimento, fazendo com que formem ligações fortes com os cristais vizinhos, originando a escoria sintética.



Figura 19: Escória sintética

Fonte: Santos 2009

Com esta técnica foi possível a introdução de óxido de cálcio a escoria do refino secundário, diminuindo a incorporação de hidrogênio no metal líquido, reduzindo o custo com a utilização de tratamento de desgaseificação.

Misra et al (2004), em seu trabalho com adição de coque no aço líquido pode comprovar que o nível de hidrogênio cai no momento em que mais coque é jogado no banho e que o coque tem cerca de aproximadamente 0,2% de hidrogênio. Como mostra a tabela abaixo.

Tabela 3: Efeito da adição de coque no teor de hidrogênio do aço líquido.

EFEITO DA ADIÇÃO DE COQUE NO TEOR DE HIDROGÊNIO DO AÇO LÍQUIDO				
	Antes da adição de coque		Após a adição de coque	
Adição de coque (g)	Oxigênio (ppm)	Hidrogênio (ppm)	Oxigênio (ppm)	Hidrogênio (ppm)
0	5,7	3,8	--	--
1140	5,5	6,28	5,2	4,84
1140	4,3	6,68	13,7	6,07
1140	8,0	8,28	6,2	6,86

Fonte Misra, 2004

Esta diminuição ocorre por causa da evolução do gás (CO) movendo o hidrogênio para fora do aço, concluindo que o coque metalúrgico não faz parte da contaminação por hidrogênio no aço líquido.

A maneira mais eficaz de diminuir o hidrogênio no aço líquido é utilizar rotas das aciarias pelo sistema de tratamento de desgaseificação a vácuo (RH Heraeus-Rheinstahl) onde tem a sua principal função produzir aços de baixo carbono, mas também reduz a quantidade de hidrogênio no banho.

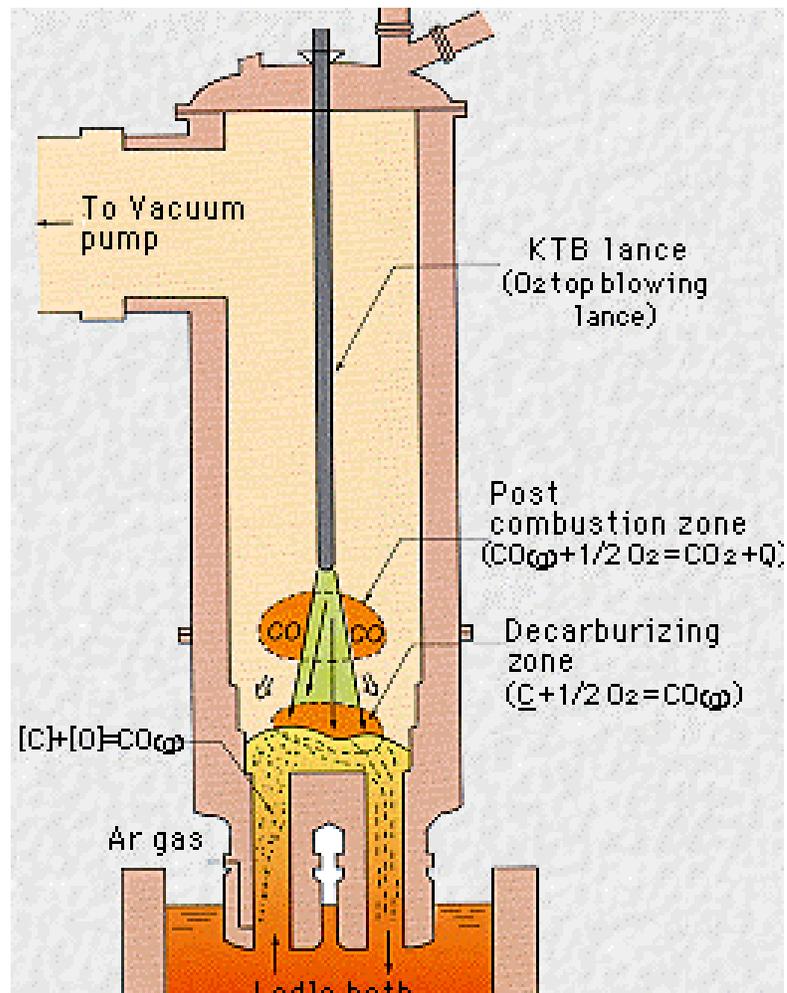


Figura 20: Estrutura do Modelo de Processo a Vácuo

Fonte: Mucciardi, 2002

Na tese de Lascoqui (2006), no processo de RH ocorre à circulação do aço líquido entre a panela e a câmara a vácuo que metalurgicamente acontecem reações de descarburização e desgaseificação, removendo o hidrogênio, oxigênio e até mesmo o nitrogênio em poucas partes, devido esta circulação é possível conseguir um ótimo resultado de retirada de inclusões não metálicas do aço líquido.

Na aciaria da Usiminas Ipatinga e segundo Nunes (2008) foi realizado uma medição on-line nas rotas do refino secundário com o equipamento Hydris e foi apresentado o seguinte resultado:

Tabela 4: Resultado do teor de hidrogênio nas rotas do refino secundário.

ROTA	TEOR DE HIDROGÊNIO MÉDIO (ppm)
CAS-OB³	8,0
FORNO PANELA	7,7
FORNO PANELA + RH	3,0
CAS-OB + RH	2,9

Fonte Nunes 2008

Para entendermos um pouco mais sobre o método de desgaseificação de acordo com Deo et al (1993) a cinética deste processo pode ser estudada sobre três enfoques diferentes.

A desgaseificação durante a fervura, com a evolução de monóxido de carbono pela reação do carbono e oxigênio dissolvido no banho onde as bolhas de monóxido de carbono representam sítios locais de baixa pressão parcial de hidrogênio para sua captação.

A desgaseificação durante a rinsagem de argônio onde estas bolhas provocam sítios locais de baixa pressão tendo a mesma eficácia da fervura.

A desgaseificação a vácuo onde a própria atmosfera ambiente apresenta uma baixa pressão parcial de hidrogênio, propiciando a sua remoção sob vácuo.

Turkdogan (1996) definiu que a taxa de remoção de hidrogênio no banho no momento da desgaseificação, se refere à transferência de massa no aço líquido, com a seguinte equação cinética:

$$\ln \left(\frac{[H]_f - [H]_e}{[H]_i - [H]_e} \right) = -k_h \cdot t$$

$[H]_f$ = concentração de hidrogênio após desgaseificação em ppm;

$[H]_i$ = concentração de hidrogênio inicial em ppm;

$[H]_e$ = concentração de hidrogênio em equilíbrio determinado pela pressão do sistema em ppm;

t = tempo de desgaseificação sob baixa pressão;

k_h = constante de remoção de hidrogênio em t^{-1} .

Uma equação mais simples para obtermos os mesmos resultados, basta usar um índice de remoção de hidrogênio na desgaseificação e trabalhar com um variável delta como mostra abaixo:

$$\Delta[H] = \frac{[H]_i - [H]_f}{[H]_i} \cdot 100\%$$

$\Delta[H]$ = variação na concentração de hidrogênio durante a desgaseificação em %.

$[H]_f$ = concentração de hidrogênio após desgaseificação em ppm;

$[H]_i$ = concentração de hidrogênio inicial em ppm.

Segundo Susaki (2008) e de acordo com a lei de Sievert, a pressão é fundamental para dissolver o hidrogênio atômico no aço líquido, e para obter a termodinâmica e cinética da desidrogenação ele usou as seguintes expressões:

$1/2 \{H_2\} = [H] \dots K = \text{ppm}[H] / (pH_2)^{1/2}$ $\log K = 2,423 - 1900/T$	
$dC_H/dt = -k_H \cdot C_H$ $\rightarrow C_H^t = C_H^o \cdot \exp(-k_H \cdot \Delta t)$	$k_H = \frac{Q}{V} \left(\frac{ak}{Q + ak} \right)$
Alguns valores de k_H Susaki (CSN): 0,065 ~ 0,080 min⁻¹ Ootsuka (Sumitomo): 0,1 min⁻¹ para [H]final > 1 ppm	
$Q = \varphi \cdot D^d \cdot G^g \cdot \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right)$	

Em algumas experiências Susaki mostrou que quanto menos pressão e um maior tempo de desgaseificação no (RH) é possível obter um menor nível deste gás no aço, como mostra a figura abaixo:

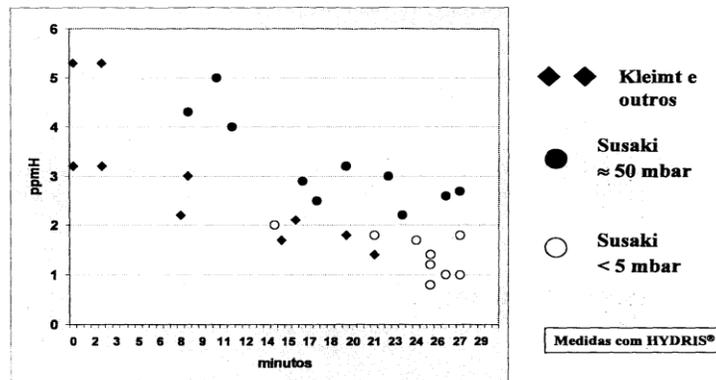


Figura 21: Experiência de tempo no desgaseificador

Fonte: Susaki, 2008

Para chegar a um nível abaixo de 1 ppm é muito difícil por causa das restrições cinéticas, onde o teor de equilíbrio deste gás jamais será atingido, mas que abaixo de 2 ppm elimina qualquer preocupação nos processos seguintes.

Uma preocupação de Fialho et al (2005) sobre o surgimento de teor de hidrogênio no distribuidor através do pó de cobertura fez com que analisasse esta contaminação e chegou a conclusão que somente ocorre contaminação na primeira corrida do distribuidor e sem diferença entre distribuidor de partida a quente e a frio, e que esta contaminação está ligada com o pó de cobertura e ou palha de arroz calcinada, não havendo distinção entre elas.

Após o aço solidificado fica bem mais difícil reduzir o teor de hidrogênio, mas já existem métodos onde podemos amenizar, mas que geram verdadeiros retrabalhos e em alguns casos eleva muito o custo do produto.

Tomita et al (1982) apresentou uma tese para melhoria dos defeitos após o lingotamento contínuo através de uma técnica de laminação intermediária ou relaminação, pode comprovar ganhos como o caldeamento de porosidade, menos segregação no aço e menor tempo de difusão do hidrogenio.

Este processo denominado (Break Down) trabalha a uma temperatura de 1150°C a 1350°C em um longo tempo ajuda a diminuir a segregação de carbono, manganês, fósforo, etc., este processo tem o objetivo de difundir o hidrogênio no meio da densidade das placas de aço e funciona conforme figura abaixo:

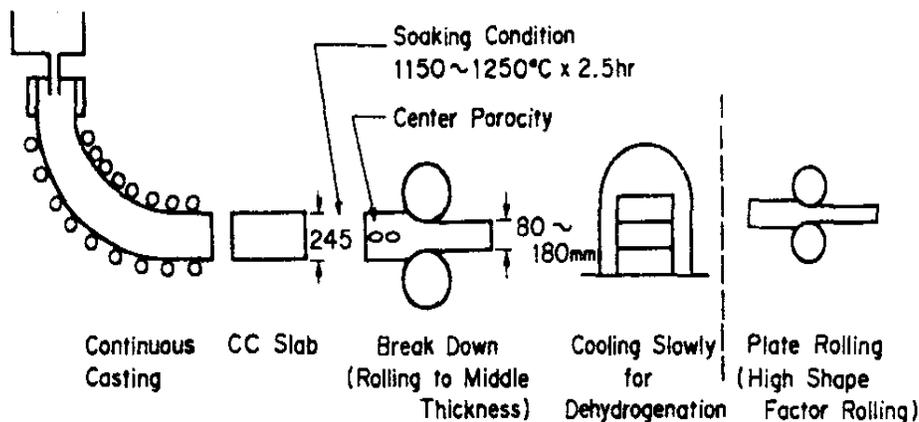


Figura 22: Processo de lingotamento contínuo com laminação intermediária

Fonte: Tomita, 1992

Após a conclusão deste processo as placas ficam empilhadas resfriando lentamente e enviadas e posteriormente para as laminações. O resultado mais significativo deste processo baseia-se na quantidade de redução de espessura que é dada durante esta laminação intermediária, quanto maior a redução maior é diminuição no teor de hidrogênio no interior da placas.

Com esta técnica foi possível comprovar a redução de hidrogênio conforme figura 23

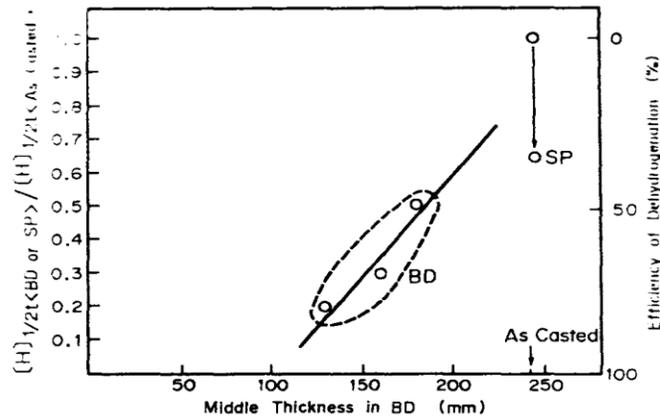


Figura 23: Resultado do teor de hidrogênio com redução da placa

Fonte: Tomita,1992

O recipiente para resfriar placas empilhadas para amenizar o nível de hidrogênio pode ser através de um poço como demonstrou Hauck et al (1986) e apresentado no XLI congresso anual da ABM em novembro de 1986, ele desenvolveu para Usiminas um modelo matemático para um ambiente totalmente fechado sem renovação de ar que simula a evolução da temperatura e do hidrogênio dissolvido, modelo bastante complexo, mas que é possível avaliar a qualquer instante as condições térmicas e o nível de hidrogênio nas placas, definindo o tempo de permanência das placas no poço em função do teor inicial do hidrogênio e do valor desejável.

Lachmund et al (2000) por diagrama esquemático de temperatura mostrou que através de um resfriamento estratégico na laminação de chapas como faz a Dillinger Hüttenwerke na Alemanha é possível conter o hidrogênio.

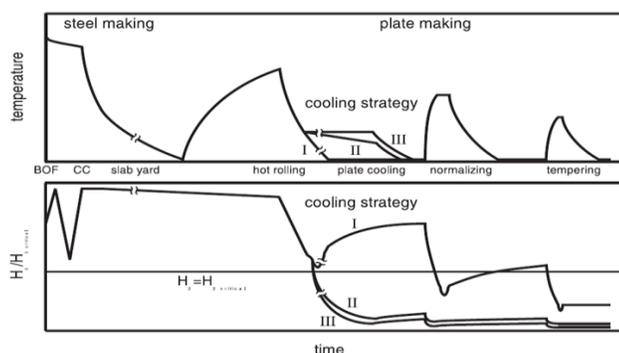


Figura 24: Diagrama para resfriamento estratégico na laminação

Fonte: Lachmund, 2000

Outra forma de amenizarmos o nível de hidrogênio no aço sólido segundo Fitzgerald (1982) seria mantermos as placas ou chapas grossas em uma temperatura constante antes e após a laminação. Dieter (1981), o hidrogênio na forma monoatômica se difunde rapidamente acima da temperatura ambiente e que um tratamento térmico a uma temperatura média diminui o teor de hidrogênio. Empilhamento de chapas grossas através de resfriamento lento após a laminação promove maior difusão do hidrogênio no aço sólido foi o que comprovou Kato et al (1992), em sua experiência no chapas grossas da Usiminas Cubatão ele acompanhou após a laminação de 226 esboços de 7 corridas onde 124 esboços foram empilhados e 102 esboços não foram empilhados, as dimensões dos esboços laminado ficou com 16mm de espessura, 3000mm de largura e 18000mm de comprimento, foi empilhada a uma temperatura média de 280°C à 350°C e após 120 horas as chapas foram desempilhadas em torno de 100°C, e teve o seguinte resultados após o ensaio no ultra-som 100% da superfície pela norma SEL 072-77CI 3:

Tabela 5: Resultado de chapas empilhadas a quente

CORRIDA	ESB. EMPILHADOS		ESB. NÃO EMPILHADOS	
	TOTAL	DESVIO	TOTAL	DESVIO
1	18	0	18	11
2	18	0	6	3
3	15	1	18	2
4	19	0	6	1
5	18	0	18	2
6	18	0	18	3
7	18	0	18	0
TOTAL	124	1	102	22
%	0,8		21,6	

Fonte: Kato, 1992

Concluiu-se que esta técnica melhora significativamente quando se empilha esboços quentes após o término da laminação.

Malynowskyj (1998) definiu em um modelo matemático estimando o tempo de difusão do hidrogênio em chapas empilhadas, com exemplo prático ele mostrou que uma chapa grossa tendo a espessura da chapa de 48mm, largura de 3000mm e comprimento de 7000mm mantida a uma temperatura constante de 400°C, com teor inicial de hidrogênio igual a 6 ppm e após 10 horas de empilhada, através deste cálculo pode comprovar a redução de hidrogênio para 4,38 ppm.

Todas estas atividades de redução do nível de hidrogênio no aço sólido gera um custo maior no produto final, pois como já dito se refere a um retrabalho. No caso de diminuirmos hidrogênio após o lingotamento contínuo é necessário uma cadeira de laminador com um potencial de redução até a metade da placa, áreas grandes para o empilhamento de placas a quente e uma excelente logística com a linha de produção seguinte.

Outro fator que elevaria demais o custo seria permanecer as placas ou chapas em temperatura constante, precisaríamos de um forno e acrescentaríamos a este produto todos os insumos usados para mantermos um forno em operação somente para esta atividade.

Manter uma temperatura constante através de empilhamento de chapas a quente é o mais econômico, mas causa transtorno quando o volume laminado ultrapassa os limites da área de empilhamento e quando esta linha trabalha em plena capacidade de produção, sem ociosidade.



Figura 24: Local de empilhamento de chapas a quente

Fonte: Própria, 2009

A logística para retirar estes esboços para empilhamento no chapas grossas Usiminas Cubatão é muito complexa, pois requer cortes da tesoura, devido à dimensão do esboço ultrapassar os 18 metros de comprimento.

Esta atividade de retirada de pedaços de esboço é realizada por pontes rolantes que tem a mesma função de voltar para a linha com os esboços que já venceram o horário de empilhamento.



Figura 25: Ponte rolante retirando e colocando chapas do empilhamento

Fonte: Própria, 2009

Se esta atividade de retirar e voltar com os pedaços de esboço for inferior ao ritmo de laminação ocasiona nesta área de empilhamento acúmulos, e a prioridade sempre vai estar na retirada para não haver perdas de temperatura.

No acabamento de chapas da Usiminas Cubatão objetiva sempre empilhar esboços de espessura acima de 12,70mm de grau de resistência alta sem mesmo saber a quantidade de hidrogênio que está no aço.

Em alguns meses chegaram a empilhar a quente no chapas grossas de um processo de laminação sem ociosidade quase 1/3 da produção do mês o que ocorre o aumento do estoque de material empilhado, e cada vez mais dificultando a logística, pois cada esboço ou chapas existe a necessidade de cumprir o seu tempo de rota após a laminação.

Tem-se como medida a evitar acúmulos, restringir a programação a laminar estes tipos de materiais, apenas mil toneladas a cada 24 horas, e objetivar o agrupamento do material no cone de laminação, isto para que a área consiga voltar com as chapas que já deram o tempo de empilhadas para a linha de produção do acabamento de chapas grossas, dando espaço para formação de novas pilhas que irá laminar.

Mas a forma ideal seria saber antes da laminação o conteúdo de hidrogênio de cada placa a ser laminada, direcionando apenas ao empilhamento somente aquelas com teor de hidrogênio preocupante.

Com um equipamento Hydris seria possível determinar na ficha de composição do aço o nível de hidrogênio no refino secundário, é com um processo informatizado chegaria nas laminações informações de como proceder para cada placa de aço após a laminação. Não foi realizados nenhuns testes quanto a este método, mas por teorias de vários autores com um nível de hidrogênio quase nulo incide na eliminação de vários retrabalhos, com isto diminuindo preocupações e custo.

CONCLUSÃO

Com a alta demanda e com perspectiva ainda maior de aços cada vez mais nobres para construção de tubos, indústria naval e outras, onde requer uma sanidade interna e externa das chapas de aço isenta de imperfeições não há como deixar de controlar o hidrogênio no processo siderúrgico.

Unanimemente os autores evidenciaram os riscos deste gás no aço, mostrando que uma produção sem o mínimo de controle acarreta enormes preocupações comprometendo todo resultado de uma empresa.

Para esta atividade de amenizar o hidrogênio no aço não há como deixar de investir em maquinários e tecnologia que abaixe o teor de hidrogênio e equipamentos que auxiliem com respostas rápidas para uma tomada de decisão.

O método mais eficiente e que gera menos preocupação nos processos seguintes seria para todos os aços de alta resistência ser obrigatório usar o desgaseificador a vácuo (RH- Heraeus-Rheinstahl) na rota do refino secundário, como ficou comprovado que dependendo da pressão e do tempo que o aço líquido fica no desgaseificador menos hidrogênio em ppm será evidenciado, melhorando a homogeneidade do aço.

Vários retrabalhos poderiam ser evitados nos processos seguintes com o nível de hidrogênio abaixo de 2ppm no aço líquido, evitaria ou diminuiria a quantidade de empilhamento a quente de placas ou chapas, menos preocupação com defeitos internos e superficiais no aço sólido.

Ficou claro que quanto menos hidrogênio no aço líquido evitaria transtornos como poros, trincas, bolsas, segregações e danos nos equipamentos, e para ter uma maior confiabilidade e resultado instantâneos do teor de hidrogênio, somente com equipamento Hydris capaz de determinar de imediato o conteúdo deste gás no aço, dando assim uma tomada de decisão segura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

BRANDALEZE, H; CAVALERI, A; REDA, L; GONZÁLEZ, E. **Determinação Del Hidrogenio Atrapado em Aceros mediante La técnica de Decoración com Plata.** 15° Conference – San Nicolas – Argentina. 2004.

BOOM, R. **Ultra refining processes – Will Stel ultimately transform into pure Iron –** Turkdogan Symposium proceeding, 1994. PP 245

CARTER, T.S., AND CORNISH, L.A. **Hydrogen in Metals.** Engineering Failure Analysis, V.8, 2001.

DORIGON, G. **Estudo do Mecanismo de Fragilização por Hidrogênio em Aços submetidos a tratamento Químico e Térmico.** Tese de Pós-Graduação UFPR, Paraná, 2003.

FIALHO, M.M; FURTADO, H.S; SANTOS, S. S. **Análise da contaminação por Hidrogênio no lingotamento contínuo da CST.** XXXVI Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais – Internacional, Vitória, ES, Brasil, 2005.

FITZGERALD, F. **Hydrogen in Steelmaking and casting.** The institution of Metallurgists. Hydrogen in Steel. Spring residential conference, nº 19, 1982.

FUJII, T; MANETA. H. R; NETO. O. A. F; CASTRO L. F. A. **Estudo da incorporação e controle do Hidrogênio na Aciaria da V&M do Brasil.** XXIV Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais, Belo Horizonte 2003.

DEO, B; BOM, R. **Fundamentals of Steelmaking Metallurgy.** [S/R], 1993, PP. 246 – 252.

DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica.** Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1981.

HAUCK, G. A. C; CARVALHO, M. B; NETO, S. V. **Determinação do índice de Desidrogenação no poço de resfriamento de placas da Usiminas.** XLI Congresso anual ABM, São Paulo, 1986.

JUNKER, T.W; KREUSER, J. J. **Hydrogen Pick-up in Steel and new methods for precise Hydrogen Analysis**. Aristech Proceeding, Volume 1, 2005.

KATO, H; MIRANDA, F. J. F. **Susceptibilidade do Aço à trinca induzida pelo Hidrogênio**. XIV Simpósio Técnico do VDL, 1986.

KATO, H; SILVEIRA, J. H. D; STUART, M. A; FORMICA, V. B. **Influencia da Desidrogenação no estado sólido para melhoria da qualidade interna de Chapas Grossas**. 47º Congresso anual, Belo Horizonte, 1992.

LACHMUND, H; SCHWINN, V; JUNGBLUT, A. **Heavy plate production demand on Hydrogen control**. Vol. 27. Iron making and Steelmaking, 2000.

LASCOQUI, P. S. BRINGHENTI. **Avaliação da limpidez do Aço líquido através da modelagem Matemática do Desgaseificador – RH da Companhia Siderúrgica de Tubarão – CST**. Tese do Mestrado apresentado à UFOP, Ouro Preto, MG – 2006.

MISRA, S; FRUEHAN, R.S. **Hydrogen and Nitrogen control in ladle and casting operation**. Iron Steel technology, Abril 2004.

NUNES, A.E. **Estudo do comportamento do Hidrogênio na fabricação de Aço**. Monografia apresentada à USP – São Paulo – 2008.

OLIVEIRA, S. P. **Concentração crítica para fragilização por Hidrogênio em Aço**. Tese Doutorado, Coppe / UFRS, Rio de Janeiro, 2002.

OLIVEIRA, S. P; MIRANDA, P.E.V. **Concentração crítica de Hidrogênio para a fragilização pelo Hidrogênio em Aços**. Coppe / UFRS – Introdução, 2000.

OSTA, S.F.A; RAMIREZ, A. H; MAVROMMATIS, K; MOLINERO, J; ALBARRANJ; IDOYAGA, Z; VALLEGGI, R; SORMANN, A. **Prediction of Hydrogen content in long Products based on a new Mathematical model e innovative Hydrogen Solid-State Sensor**. Luxemburg – 2007. PP. 3–130.

PRONSATO, M.E; BRIZUELA, G; JUAN, A. **The Electronic structure and location of H pairs in BBC Fe Edge dislocation**. Applied surface Science, V. 173, 2001.

RODRIGUES, J. A. **Fundamentos da Reação Metal – Gás em gases, metais e ligas, Fundamentos e aplicações na Engenharia.** Rio de Janeiro: Editora Didática e Científica Ltda. 1994.

SANTOS, M.A; CUNHA, R.C; SOUZA, J. G; PONTELO, P.C; PONTES, P. A. F. **Aplicação de Escória Sintética Sinterizada Tecnosulfur Tecslag – Fluid 2277 a base de CO para redução de H₂ no Aço durante o refino secundário.** 40º Seminário de Aciaria – Internacional – São Paulo – 2009.

SUSAKI, K. **Refino secundário de Aços.** Apostila do curso de Pós-Graduação Metalurgia com ênfase em Siderurgia – FEI – 2008.

SHUWARS, S. **Following the trail of Hydrogen – Hydrogen induced material separation and its consequences.** Der warm be hand lungs markt, 1 / 2000.

TOMITA, Y; KIKUTAKE, T; NAGAHIRO, K; OKAMOTO, K; NAKAO, H. **Prevention of Hydrogen cracking in thick Steel plates produced from continuous casting slabs.** American Society for Metals, 1982. PP. 63 – 69.

VALADARES, C. A. **Lingotamento contínuo de placas.** São Paulo: ABM. 2005.

ANEXOS

ANEXO 1 – TABELA PERIODICA

Tabela Periódica dos Elementos

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 1 H 1,00784	2 2 He 4,002602	3 3 Li 6,941	4 4 Be 9,012182	5 5 B 10,811	6 6 C 12,0107	7 7 N 14,0074	8 8 O 15,9994	9 9 F 18,998432	10 10 Ne 20,1797	11 11 Na 22,989769	12 12 Mg 24,3050	13 13 Al 26,981538	14 14 Si 28,0855	15 15 P 30,973761	16 16 S 32,06	17 17 Cl 35,453	18 18 Ar 39,948
19 19 K 39,0983	20 20 Ca 40,078	21 21 Sc 44,955910	22 22 Ti 47,887	23 23 V 50,9415	24 24 Cr 51,9961	25 25 Mn 54,938049	26 26 Fe 55,845	27 27 Co 58,933200	28 28 Ni 58,6934	29 29 Cu 63,546	30 30 Zn 65,409	31 31 Ga 69,723	32 32 Ge 72,64	33 33 As 74,92160	34 34 Se 78,96	35 35 Br 79,904	36 36 Kr 83,798
37 37 Rb 85,4678	38 38 Sr 87,62	39 39 Y 88,90585	40 40 Zr 91,224	41 41 Nb 92,90638	42 42 Mo 95,94	43 43 Tc (98)	44 44 Ru 101,07	45 45 Rh 102,90550	46 46 Pd 106,42	47 47 Ag 107,8682	48 48 Cd 112,411	49 49 In 114,818	50 50 Sn 118,710	51 51 Sb 121,760	52 52 Te 127,60	53 53 I 126,90447	54 54 Xe 131,293
55 55 Cs 132,90545	56 56 Ba 137,327	57 to 71 57 to 71 Lantanídeos	72 72 Hf 178,49	73 73 Ta 180,9479	74 74 W 183,84	75 75 Re 186,207	76 76 Os 190,23	77 77 Ir 192,222	78 78 Pt 195,078	79 79 Au 196,96655	80 80 Hg 200,59	81 81 Tl 204,3833	82 82 Pb 207,2	83 83 Bi 208,98038	84 84 Po (209)	85 85 At (210)	86 86 Rn (222)
87 87 Fr [223]	88 88 Ra [226]	89 to 103 89 to 103 Atômicos	104 104 Rf [261]	105 105 Db [262]	106 106 Sg [266]	107 107 Bh [264]	108 108 Hs [265]	109 109 Mt [268]	110 110 Ds [271]	111 111 Rg [272]	112 112 Uub [285]	113 113 Uut [284]	114 114 Uuq [289]	115 115 Uup [288]	116 116 Uuh [282]	117 117 Uus [286]	118 118 Uuo [286]

Massas atômicas em parênteses são aquelas do isótopo mais estável ou comum.

71 71 Lu 174,967	72 72 Hf 178,49	73 73 Ta 180,9479	74 74 W 183,84	75 75 Re 186,207	76 76 Os 190,23	77 77 Ir 192,222	78 78 Pt 195,078	79 79 Au 196,96655	80 80 Hg 200,59	81 81 Tl 204,3833	82 82 Pb 207,2	83 83 Bi 208,98038	84 84 Po (209)	85 85 At (210)	86 86 Rn (222)	87 87 Fr [223]	88 88 Ra [226]												
89 89 Ac [227]	90 90 Th 232,0381	91 91 Pa 231,03688	92 92 U 238,02891	93 93 Np 237	94 94 Pu 244	95 95 Am [243]	96 96 Cm [247]	97 97 Bk [247]	98 98 Cf [251]	99 99 Es [252]	100 100 Fm [257]	101 101 Md [258]	102 102 No [259]	103 103 Lr [260]	104 104 Rf [261]	105 105 Db [262]	106 106 Sg [266]	107 107 Bh [264]	108 108 Hs [265]	109 109 Mt [268]	110 110 Ds [271]	111 111 Rg [272]	112 112 Uub [285]	113 113 Uut [284]	114 114 Uuq [289]	115 115 Uup [288]	116 116 Uuh [282]	117 117 Uus [286]	118 118 Uuo [286]

Nota: Os números de subgrupo 1-18 foram adotados em 1984 pela International Union of Pure and Applied Chemistry (União Internacional de Química Pura e Aplicada). Os nomes dos elementos 112-118 são os equivalentes IUPAC dos seus números.