

CAROLINA MILEK DE ANDRADE

OTIMIZAÇÃO DO RESFRIAMENTO DE PLACAS ESPESSAS
VISANDO A ELIMINAÇÃO DE HIDROGÊNIO

Trabalho de formatura apresentado
à Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo para obtenção do
Título de Engenheiro de Materiais

Área de concentração:
Engenharia de Materiais

Orientador:
Marcelo de Aquino Martorano

São Paulo
2006

FICHA CATALOGRÁFICA

de Andrade, Carolina Milek

Otimização do resfriamento de placas espessas visando a eliminação de hidrogênio. São Paulo, 2006.

109 p.

Trabalho de formatura (Graduação) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

1. Fragilidade pelo hidrogênio 2. Resfriamento de placas de aço

I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Agradecimentos

Ao professor e orientador Marcelo de Aquino Martorano pela dedicação, apoio e paciência na elaboração deste relatório.

Aos meus orientadores da França, Lionel Coudreuse, Isabelle Poitrault e Christophe Desrayaud, pela ajuda na realização deste trabalho.

Ao Grupo Arcelor, pela bolsa de estudos e pela oportunidade de estudar dois anos na França.

Aos meus colegas e professores da Poli, por tornar inesquecível o meu período de faculdade.

Aos meus amigos de infância, meus pais e meus irmãos por todo amor e carinho e por tudo o que me proporcionaram até hoje.

Ao meu noivo Laurent, pelo seu amor, carinho, apoio e dedicação.

Resumo

O resfriamento de placas após laminação é uma etapa importante na fabricação de placas espessas na usina de Châteauneuf (Arcelor Industeel Loire), França. Ele consiste em resfriar as placas ao ar e, em seguida, submetê-las a um resfriamento lento em um leito de rochas vulcânicas, técnica chamada de "Fraisil". Este resfriamento tem o objetivo de promover a difusão do hidrogênio para o exterior da placa e, assim, evitar a fragilidade pelo hidrogênio.

O presente trabalho tem o objetivo de modelar matematicamente a transferência de calor e a difusão de hidrogênio durante o resfriamento das placas com o auxílio de medidas experimentais. Uma campanha de medidas foi organizada na usina de Châteauneuf para obter dados experimentais do ciclo de resfriamento das placas. A partir desses dados, simulações numéricas foram realizadas no programa Forge®_2005. Os resultados das simulações foram comparados aos dados obtidos do resfriamento.

O modelo matemático desenvolvido foi finalmente utilizado para otimizar o processo de resfriamento das placas, permitindo um ganho de até 70% no tempo de resfriamento das placas espessas. No entanto, é necessário levar em conta as segregações metalúrgicas que ocorrem durante a solidificação. Este problema será o tema de futuros trabalhos.

Resumé

Le refroidissement des tôles après laminage est une étape importante dans la fabrication de tôles épaisses à l'usine de Châteauneuf (Arcelor Industeel Loire). Il consiste à refroidir les tôles à l'air et ensuite les soumettre à un refroidissement lent dans un lit de roches volcaniques, technique appelée "Fraisil". Ce refroidissement a pour but de faire diffuser l'hydrogène vers l'extérieur de la tôle et ainsi éviter la fragilisation par l'hydrogène.

Une campagne de mesures a été organisée à l'usine de Châteauneuf pour obtenir les données expérimentales du cycle de refroidissement des tôles. A partir de ces données, des simulations numériques (thermique et de diffusion de l'hydrogène) ont été réalisées sous Forge2005®. Les résultats des simulations ont été comparés aux conditions actuelles de refroidissement des tôles.

Les résultats sont satisfaisants. L'optimisation pourrait permettre à l'usine d'avoir des gains de temps jusqu'à 70% sur le refroidissement des tôles épaisses. Cependant, il faudrait prendre en compte les ségrégations métallurgiques lors de la solidification. Ce problème pourra être le sujet d'études futures.

Sumário

1. Introdução	11
1.1. Apresentação da empresa	12
1.1.1. Um grupo em crescimento mundial	12
1.1.2. Atividades do grupo Arcelor	13
1.2. Industeel	14
1.2.1. Industeel Loire.....	15
1.2.2. O Centro de Pesquisas de Materiais.....	16
2. Objetivo	18
3. Revisão de Literatura	19
3.1. Laminação a quente.....	19
3.2. Fragilidade dos aços pelo hidrogênio (FPH).....	21
3.2.1. Hidrogênio no aço	21
3.2.2. Solubilidade do hidrogênio no aço	22
3.2.3. Difusão do hidrogênio no aço	22
3.2.4. A fragilidade pelo hidrogênio	23
3.3. Transporte de calor e de hidrogênio em placas de aço.....	25
3.3.1. Transporte de calor.....	25
3.3.2. Transporte de hidrogênio no aço	26
4. Materiais e Métodos	28
4.1. Procedimentos Experimentais.....	28
4.1.1. Processamento dos lingotes em Châteauneuf.....	28
4.1.2. Definição dos aços estudados.....	33
4.1.3. Processamento dos aços estudados	37
4.1.4. Medidas de temperatura	38
4.2. Simulação Matemática	40
4.2.1. Modelo Matemático	40
4.2.2. Resolução das equações do modelo	46
4.2.3. Obtenção dos parâmetros de simulação	53
4.2.4. Condições de simulação e propriedades utilizadas	56
5. Resultados.....	58
5.1. Medidas de temperatura	58
5.1.1. Resfriamento ao ar	58
5.1.2. Fraisil.....	59
5.2. Resultado das simulações.....	61
5.2.1. Obtenção dos coeficientes de troca de calor durante as etapas de conformação a quente e resfriamento ao ar.	61
5.2.2. Propriedades térmicas do Fraisil	64
5.3. Otimização do resfriamento de placas espessas após laminação	66
5.3.1. Otimização do resfriamento ao ar	67
5.3.2. Fraisil.....	69
5.3.3. Redução do tempo de resfriamento	73
5.3.4. Ciclo de resfriamento otimizado	74
6. Conclusões.....	75

<i>7. Perspectivas e Trabalhos Futuros</i>	<i>76</i>
<i>8. Referências Bibliográficas</i>	<i>77</i>
<i>Anexos.....</i>	<i>78</i>

Lista de Figuras

Figura 1: Evolução do faturamento anual bruto da Arcelor (a) e repartição do faturamento anual bruto por atividade (b).	13
Figura 2: Histórico da sociedade INDUSTRIAL.	15
Figura 3: Laminador quadruo reversível (a) e prensa de forjamento em linha (b).	16
Figura 4: Princípio da laminação.	19
Figura 5: Laminador Quadruo.	20
Figura 6: Lingote (a) saindo do forno antes da laminação, e resfriando (b) após laminação a quente.	20
Figura 7: Placa de aço para molde (a) e exemplo de aplicação desta placa (b).	21
Figura 8: Defeitos induzidos pelo hidrogênio – olho de peixe (a) e fissuras de segregação (b) [4]	24
Figura 9: Esquema do processo de fabricação de placas de Industeel Loire.	29
Figura 10: Operações sofridas pelo lingote bruto da aciaria. (*) = Etapas estudadas neste trabalho.	30
Figura 11: O Fraissil na usina de Châteauneuf.	32
Figura 12: Análise de hidrogênio dos aços produzidos entre os anos 2003 e 2005. Todos os aços (a) e aço SP300 (b).	34
Figura 13: Tipos de aços no Fraissil - 2003 a 2005.	36
Figura 14: Resfriamento de aços no Fraissil durante 5 dias – distribuição por tipo de aço.	36
Figura 15: Esquema indicando os locais das medidas de temperatura nas placas, durante resfriamento ao ar.	39
Figura 16: Esquema indicando o posicionamento dos termopares durante a campanha de medidas de temperatura no Fraissil.	39
Figura 17 : Indicação de eixos, superfícies e domínio de cálculo da placa estudada, onde E, L e W indicam a espessura, o comprimento e a largura da placa, respectivamente.	40
Figura 18 : Indicação de eixos, superfícies e domínio de cálculo da placa estudada, onde E, L e W indicam a espessura, o comprimento e a largura da placa, respectivamente.	41
Figura 19: Lançador de soluções Transvalor.	48
Figura 20: Esquema de funcionamento do programa Forge®_2005.	49
Figura 21: Exemplo de contorno criado a partir do Qcad.	50
Figura 22: Malha a três nós de uma placa.	51
Figura 23: Definição do eixo de simetria à meia-largura.	52
Figura 24: Localização dos sensores de temperatura no programa Forge_2005®.	53
Figura 25: Posição dos termopares na placa.	54
Figura 26: Modelo placa + Fraissil utilizado nas simulações.	55
Figura 27: Curvas de resfriamento na superfície das placas durante resfriamento ao ar medidas por pirômetro óptico.	58
Figura 28: Perfil da temperatura na superfície de duas placas diferentes e no Fraissil durante resfriamento controlado.	59
Figura 29: Curvas experimentais de resfriamento para uma placa de espessura 424 mm.	60
Figura 30: Perfil de temperatura para uma placa 2068mm X 596mm após 9h14 de resfriamento ao ar.	61
Figura 31: Curvas de resfriamento para placas de diferentes espessuras.	62

<i>Figura 32: Comparação entre os dados experimentais (pirômetro óptico) e os resultados de simulação (sensores 1, 2 e 3) de uma placa de 480 mm de espessura – $h=12W/m^2.K$.</i>	63
<i>Figura 33: Exemplo de superposição dos resultados de simulação com os dados experimentais.</i>	64
<i>Figura 34: Curva experimental de resfriamento de uma placa de 500 mm no Fraisil.</i>	65
<i>Figura 35: Tempo máximo de repouso ao ar para placas de espessura 400 mm (a) e 750 mm (b).</i>	67
<i>Figura 36: Resultados da otimização do resfriamento ao ar de placas espessas.</i>	68
<i>Figura 37: Perfil de temperatura na placa SP300® de 400 mm de espessura no momento em que ela é colocada no Fraisil. Norma atual (a) e com resfriamento ao ar otimizado (b).</i>	70
<i>Figura 38: Perfil da concentração de hidrogênio na placa SP300® de 400 mm de espessura no momento em que ela é colocada no Fraisil. Norma atual (a) e com resfriamento ao ar otimizado (b).</i>	70
<i>Figura 39: Perfil da concentração de hidrogênio na placa SP300® de 400 mm de espessura após 5 dias de resfriamento no Fraisil. Norma atual (a) e resfriamento ao ar otimizado (b).</i>	71
<i>Figura 40: Evolução da temperatura em uma placa de 400 mm durante resfriamento no Fraisil. Ciclo atual (a) e resfriamento ao ar otimizado (b).</i>	71
<i>Figura 41: Evolução da concentração de hidrogênio em uma placa de 400 mm durante resfriamento no Fraisil. Ciclo atual (a) e resfriamento ao ar otimizado (b).</i>	72
<i>Figura 42: Ciclo de conformação e resfriamento otimizado para uma placa de 400mm de espessura. Os dois gráficos possuem os mesmos eixos.</i>	74

Lista de Tabelas

<i>Tabela 1: Normas de resfriamento, usadas na usina de Châteauneuf, para os aços SP300 e SP400.</i>	<i>33</i>
<i>Tabela 2: Situação da ocupação do Fraisil para os anos de 2003 a 2005.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabela 3: Número de lingotes dos tipos de aços mais utilizados no Fraisil.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabela 4: Placas submetidas à campanha de medidas de temperatura.</i>	<i>37</i>
<i>Tabela 5: Propriedades das placas utilizadas nas simulações de otimização do resfriamento.</i>	<i>38</i>
<i>Tabela 6 : Condições térmicas de simulação (placa).</i>	<i>56</i>
<i>Tabela 7: Condições de transferência de massa.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabela 8: Condições de simulação do resfriamento no Fraisil.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabela 9: Ganho de tempo no resfriamento ao ar após otimização.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabela 10 : Ganho de tempo no resfriamento ao Fraisil após otimização.....</i>	<i>73</i>

1. Introdução

A fragilidade dos aços pelo hidrogênio é uma das principais causas de fratura de peças nas indústrias. Estas, ao longo do tempo, criaram e implantaram técnicas para diminuir a concentração média de hidrogênio no aço, que está diretamente ligada à fragilidade pelo hidrogênio. Na mais usada destas técnicas, o aço líquido é submetido a um tratamento de degaseificação na aciaria.

A ARCELOR Industeel Loire, localizada na França, produz placas de aços especiais espessas. A fragilidade pelo hidrogênio sempre foi um problema enfrentado pela empresa, devido à dimensão dos seus produtos. Muitos avanços foram feitos neste domínio e a empresa, para evitar defeitos ligados ao hidrogênio, utiliza uma técnica de desidrogenação de placas de aço no estado sólido. Esta técnica consiste no resfriamento dessas placas de maneira controlada, fornecendo condições cinéticas suficientes para a difusão de hidrogênio dentro da placa.

Na usina de Châteauneuf, o resfriamento dos produtos mais sensíveis é feito enterrando as placas em um parque de rochas vulcânicas chamado Fraisil. O tempo de repouso dentro do Fraisil e a área do parque necessária para atender a produção de placas fazem desta etapa um dos fatores limitantes do processo de fabricação de placas espessas. Este tratamento é eficaz na prevenção de defeitos ligados ao hidrogênio e, atualmente, as normas de resfriamento no Fraisil são resultantes de evoluções sucessivas e são baseadas na experiência da empresa (normas empíricas).

Como a demanda do mercado está aumentando, ARCELOR Industeel Loire decidiu realizar um estudo detalhado do ciclo de resfriamento de placas da usina, para otimizar esta etapa da fabricação de placas espessas.

Este presente trabalho apresentará a metodologia e os resultados do modelamento matemático do resfriamento de placas espessas após conformação a quente.

1.1. Apresentação da empresa

Arcelor nasceu de um encontro e de uma vontade : o acordo entre as sociedades Aceralia (Espanha), Arbed (Luxemburgo) e Usinor (França); a vontade de três grupos europeus de concentrar suas competências técnicas, industriais e comerciais em um projeto comum, para criar um líder mundial com a ambição de se afirmar como uma referência da indústria siderúrgica.

O Grupo opera oficialmente a partir de 19 de Fevereiro de 2001, mas a fusão foi efetivada em 18 de Fevereiro de 2002 com a cotação das ações Arcelor na bolsa de valores. O nome Arcelor para o novo grupo foi anunciado em 12 de Dezembro de 2001.

1.1.1. Um grupo em crescimento mundial

Arcelor se tornou o número dois da siderurgia com um faturamento bruto de 32,6 bilhões de euros em 2005 (Figura 1). O grupo é líder nos seus principais mercados : automobilística, construção, eletrodomésticos e embalagem, assim como a indústria em geral. A criação da Arcelor Brasil e a integração completa da CST em 2005 tiveram um papel chave na expansão das atividades da Arcelor no mundo. Com a aquisição da Dofasco no Canadá, Arcelor consolidou a sua liderança no mercado automobilístico, e então reforçou sua presença na América do Norte. O grupo, primeiro produtor de aço na Europa e na América Latina, tem a ambição de continuar a sua expansão internacional, a fim de aproveitar o potencial de crescimento das economias emergentes e de oferecer soluções de aços inovadoras aos seus clientes.

Em 2006, Arcelor conta com 110 000 pessoas, empregadas em mais de 60 países. O desenvolvimento sustentável está presente na estratégia da Arcelor. A empresa visa ser uma referência em matéria de performance econômica, de relações sociais e de responsabilidade social.

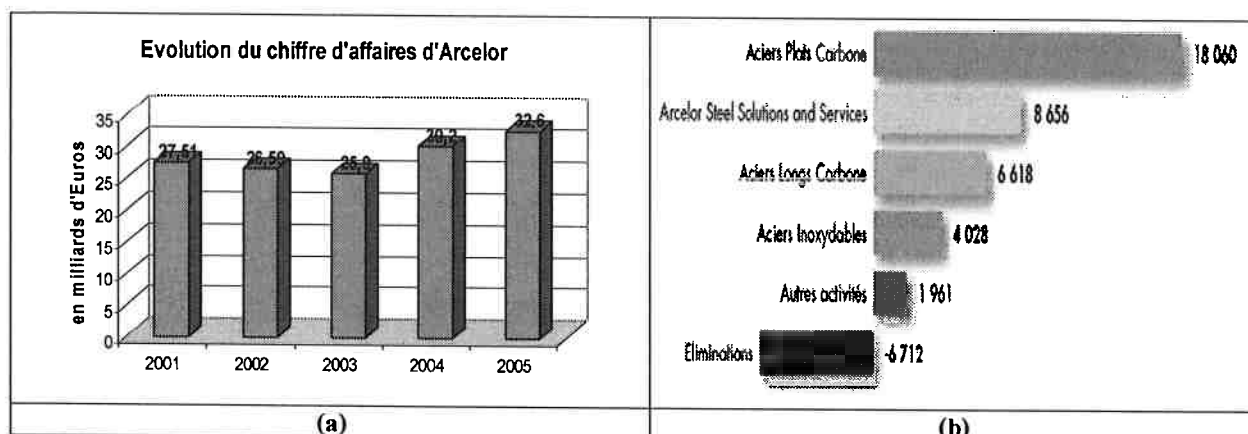


Figura 1: Evolução do faturamento anual bruto da Arcelor (a) e repartição do faturamento anual bruto por atividade (b).

1.1.2. Atividades do grupo Arcelor

Arcelor é um fornecedor de aços de alta qualidade, líder nos seus 4 principais mercados:

- **Automobilística:** Arcelor é o primeiro fornecedor de aço-carbono plano para a indústria automobilística mundial, com uma participação de 15% do mercado mundial. O aço Arcelor é utilizado para a fabricação de um entre dois carros na Europa. O grupo trabalha em colaboração estreita com os construtores de automóveis desde o começo da concepção de um novo veículo – o aço representa 50% do peso total de um automóvel.
- **Construção:** em 2005, Arcelor forneceu 12,5 milhões de toneladas à indústria da construção mundial e é uma referência no mercado da construção. Este setor é um eixo prioritário de desenvolvimento para a Arcelor, que melhora constantemente sua oferta com produtos e soluções inovadoras.
- **Eletrodomésticos:** Arcelor é o grupo número um europeu do mercado de aços para eletrodomésticos. Parceira de todos os grandes fabricantes internacionais de eletrodomésticos, Arcelor desenvolve com eles soluções inovadoras de aço adaptadas às suas necessidades, o que faz progredir o desempenho de aparelhos, e aumentam seu conforto na utilização.

- Embalagem: líder europeu do mercado de latas de bebidas e de aplicações técnicas, Arcelor desenvolveu com os seus clientes uma relação de proximidade baseada na inovação, graças aos contatos locais que permitem respostas sistemáticas às novas necessidades.

1.2. Industeel

INDUSTEEL é uma filial do grupo Arcelor especializada em aços especiais : aços-carbono de alta tecnologia, aços-liga e baixa liga, aços inoxidáveis e ligas diversas. A gama de produtos é abrangente : de 3 a 1000 mm de espessura e com pesos de até 100t.

A vocação da INDUSTEEL é fornecer soluções em aços como resposta às necessidades de clientes ligados ao setor de equipamentos industriais. Pode-se então relacionar as diferentes categorias de aços e suas aplicações industriais :

- Aços para moldes e ferramentas: moldes de injeção de plástico e ferramentas para trabalho de metais a frio ou a quente,...
- Aços inoxidáveis e suas ligas: indústrias químicas e petroquímicas, tratamento de água,...
- Aços especiais para reservatórios de pressão: aplicações em criogenia, petroquímica, refinamento,...
- Aços resistentes à abrasão : indústria mineral, construção civil,...
- Aços de alta resistência : construção civil,...
- Aços especiais diversos : armamento, plataformas offshore,...

A empresa possui três instalações complementares :

- INDUSTEEL Creusot (Saône-et-loire) é especializada em placas, lingotes de forjas, peças conformadas,
- INDUSTEEL Loire em Châteauneuf / St Chamond é especializada em placas hiper-pesadas, peças conformadas, perfilados.
- INDUSTEEL BELGIUM, localizada em Charleroi, Bélgica, é especializada em placas e bobinas.

INDUSTEEL possui também um centro de pesquisa e desenvolvimento para todas as instalações, o Centro de Pesquisas de Materiais do Creusot (CRMC).

Em Dezembro de 2004, INDUSTRIEEL contava com 2060 empregados e possuía um faturamento anual bruto de 711 milhões de euros (953 milhões de euros em 2005). A produção global anual foi de 343 kt.

O histórico da sociedade pode ser resumido pelo seguinte diagrama:

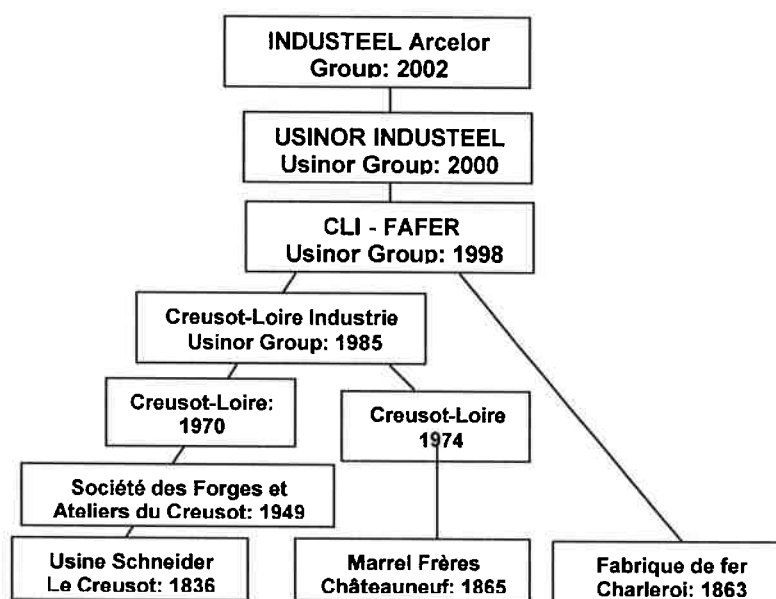


Figura 2: Histórico da sociedade INDUSTRIEEL.

1.2.1. Industeel Loire

Arcelor Industeel Loire é localizada em Châteauneuf/Saint-Chamond. Seu efetivo é de 350 pessoas e sua produção expedida alcançou 53kt em 2005. A empresa produz placas espessas de 100 a 900 mm de espessura, de até 4,5 m de largura e com peso podendo alcançar 100 t. O seu faturamento em 2005 foi de aproximadamente 110 milhões de euros.

A aciaria é constituída de diversas unidades de produção:

- Um forno elétrico construído em 1977 (diâmetro de 5.8 m; capacidade de 100 kt/ano; potência de 33 MVA ; peso de uma panela: 70 a 87 t).
- Uma instalação de desgazeificação do tipo RH construída em 2000.
- Refinamento em panela aquecida.

A estação de tratamento térmico, conformação a quente e acabamento possui numerosas ferramentas:

- 1 máquina de escarfigem oxi-acetilênica automática.
- 4 fornos de aquecimento de 100 a 250 t.
- 1 laminador quarto reversível com decapagem a água.
- 1 prensa de forjamento em linha de 12 000 t.
- 1 área de resfriamento controlado (Fraisil).
- 5 fornos de tratamento térmico.
- 1 tanque de têmpera a água.
- 2 esmerils automáticos.
- 1 prensa de desempenamento de 12 000 t.
- 1 polidora.
- Bancos de oxi-corte.

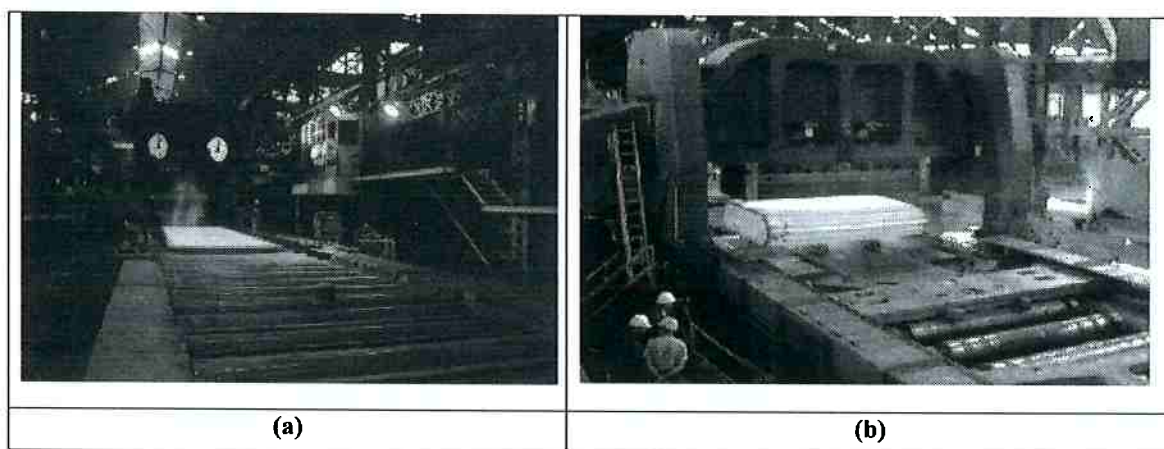


Figura 3: Laminador quadroo reversível (a) e prensa de forjamento em linha (b).

1.2.2. O Centro de Pesquisas de Materiais

O Centro de Pesquisas de Materiais do Creusot, ou CRMC, é o centro de pesquisa comum ao conjunto de instalações da INDUSTEEL e beneficia-se de 1,5% do faturamento anual da empresa. O CRMC emprega 55 pessoas, entre elas 23 engenheiros.

As atividades do CRMC são consagradas à pesquisa e ao desenvolvimento de materiais, à assistência à fabricação, a diferentes serviços (soldagem,

conformação,...), e à resistência dos produtos em serviço (fragilidade pelo hidrogênio, H₂S, corrosão, fluência,...).

O CRMC é dividido em três centros de atividades:

- Departamento AS : este departamento é encarregado pelos estudos ligados à usinabilidade, à metalurgia dos aços para moldes e ferramentas, dos aços resistentes à abrasão, e dos aços destinados às aplicações militares.
- Departamento INOX: encarregado dos estudos de metalurgia dos aços inoxidáveis e suas ligas, da corrosão e da metalurgia de placas tratadas superficialmente.
- Departamento industrialização e 3C: encarregada de projetos sobre a metalurgia dos aços para a indústria de energia, para a construção e a criogenia. Este departamento agrupa também:
 - Um serviço "estudo e simulação de processos"
 - Os ensaios mecânicos (ensaios padrões, mecânica da fratura, fluência)
 - A soldagem
 - As investigações aprofundadas (microscopia eletrônica, microsonda,...).

2. Objetivo

O objetivo deste trabalho é modelar matematicamente a transferência de calor e difusão de hidrogênio que ocorrem no resfriamento controlado de placas de aço, realizado na usina de Châteauneuf, França. O modelo construído será examinado e posteriormente utilizado para otimizar os procedimentos do resfriamento controlado.

3. Revisão de Literatura

Neste capítulo, serão abordados os tópicos necessários para a compreensão do trabalho. A revisão de literatura começa por uma breve explicação do processo de laminação a quente de placas de aço, seguida pelo fenômeno de fragilidade dos aços pelo hidrogênio. Em seguida, será feita uma abordagem matemática da transferência de calor e de hidrogênio em placas de aço laminadas a quente.

3.1. Laminação a quente

A laminação faz parte das grandes técnicas de produção do aço. É este o método utilizado para diminuir a espessura de placas de aço: originária de um lingote de aço (frio ou quente), a placa é passada entre 2 rolos, reduzindo a sua espessura (Figura 4). Desta maneira, não somente a espessura é alterada, mas a microestrutura metalúrgica é refinada e as propriedades mecânicas da placa melhoradas.

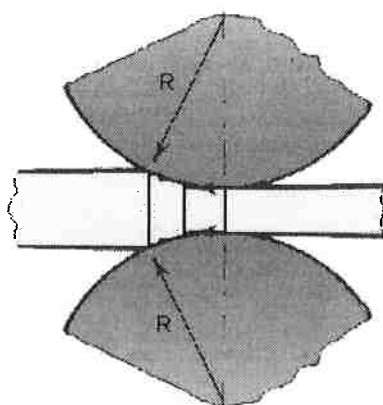


Figura 4: Princípio da laminação.

Um tipo de laminador frequentemente utilizado nas usinas é o Quadruo (Figura 5), que é composto por dois cilindros de trabalho e por dois cilindros de apoio.

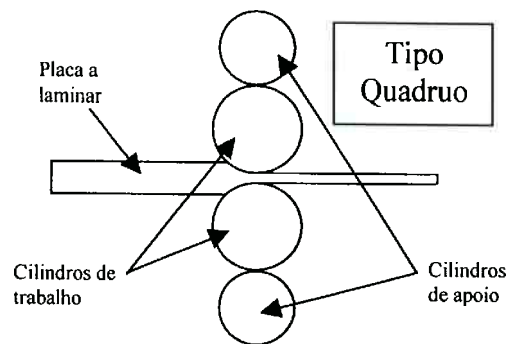


Figura 5: Laminador Quadruo.

A laminação a quente é usada quando se necessita trabalhar um produto com uma grande seção, ou seja, que precisa de deformações elevadas. A laminação é geralmente realizada a uma temperatura $T > 0,5T_{\text{fusão}}$.

A laminação a quente é utilizada na produção de placas grossas (Figura 6). Uma placa grossa é um produto plano laminado de espessura $\geq 4.76 \text{ mm}$ ^[6], que tem diversas aplicações, como por exemplo:

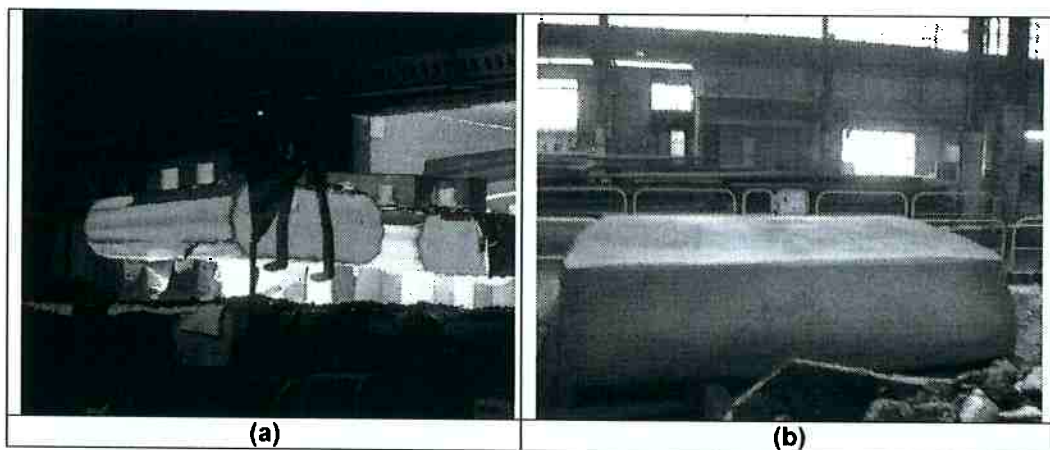


Figura 6: Lingote (a) saindo do forno antes da laminação, e resfriando (b) após laminação a quente.

- Em moldes para injeção plástica (Figura 7);
- Na calderaria, na construção de pontes, reservatórios, caldeiras, etc.;
- Na construção naval;
- Em plataformas de extração ou exploração de produtos petrolíferos no mar;
- Em gazeodutos ou oleodutos, sobre o solo ou imersos;

- Na mecosoldagem.

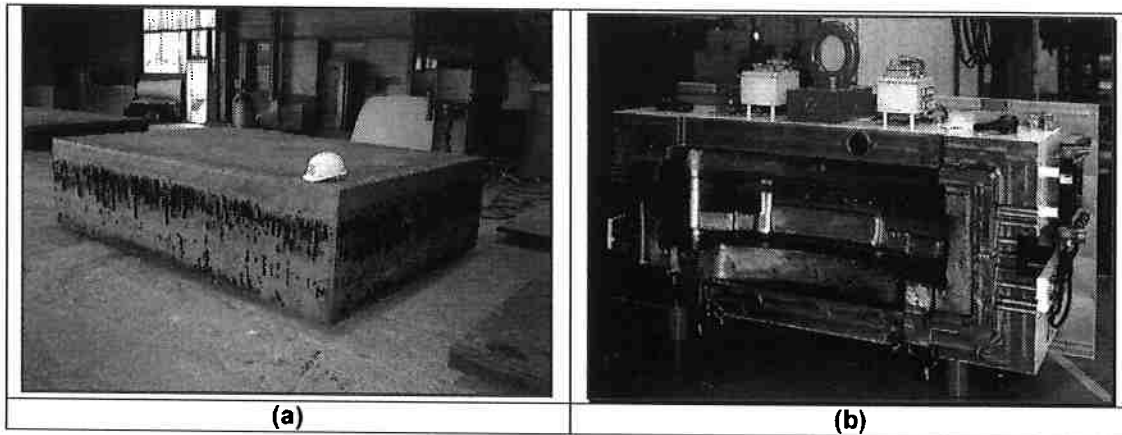


Figura 7: Placa de aço para molde (a) e exemplo de aplicação desta placa (b).

3.2. Fragilidade dos aços pelo hidrogênio (FPH)

3.2.1. Hidrogênio no aço

O hidrogênio é o menor dos átomos, resultando em uma grande solubilidade e mobilidade no ferro e nos aços. Esta mobilidade é devida ao seu tamanho, à sua massa e à existência de uma forte densidade de interstícios disponíveis.

A origem do hidrogênio interno no aço pode ser de diversos tipos^[5]:

- Ar que entrou mecanicamente durante a elaboração do aço, ar contido dentro dos moldes e que não pôde sair;
- Gases dissolvidos no metal;
- Hidrogênio introduzido durante as operações de transformação ou de manipulação do aço (tratamentos térmicos, soldagem).

Os diferentes estados possíveis do hidrogênio nos aços dependem da sua atividade, da sua temperatura e da microestrutura do material. Ele existe sob múltiplas formas^[5]:

- O hidrogênio sob a forma de próton (H) ;
- O hidrogênio sob a forma molecular (H_2) ;
- O hidrogênio adsorvido (H_a) ;
- O hidrogênio combinado a defeitos da matriz (H_p) ;

- O hidrogênio combinado a outras substâncias (H_c).

Nos próximos subitens, dados relativos à solubilidade e mobilidade do hidrogênio na forma de próton (H) serão apresentados.

3.2.2. Solubilidade do hidrogênio no aço

A variação da solubilidade do hidrogênio no ferro α em função da pressão e da temperatura pode ser descrita como: ^[5]

$$C_{H(Fe\alpha)} = 3,3 \times 10^{-5} p^{1/2} \exp\left(\frac{-28600}{RT}\right) \quad (1)$$

onde :

- S solubilidade (ppm massa),
 p pressão do hidrogênio (atm),
 R constante molar dos gases ($J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$),
 T temperatura (K).

Esta expressão é tradicionalmente conhecida como Lei de Sievert.

Nos aços austenísticos, a solubilidade é dada pela seguinte relação: ^[5]

$$C_{H(aço\gamma)} = 33,1 \times 10^{-5} p^{1/2} \exp\left(\frac{-11080}{RT}\right) \quad (2)$$

3.2.3. Difusão do hidrogênio no aço

Devido a sua pequena solubilidade, o hidrogênio difunde-se no ferro de acordo com os mecanismos de difusão intersticial. A seguinte relação é atribuída ao coeficiente de difusão do hidrogênio no ferro α ^[5]:

$$D = 5,12 \times 10^{-4} \exp\left(\frac{-4150}{RT}\right) \quad (3)$$

onde :

- D coeficiente de difusão ($cm^2 \cdot s^{-1}$),
 R constante molar dos gases ($J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$),
 T temperatura (K).

Para os aços austeníticos (ferro γ), tem-se: ^[5]

$$D = 5,8 \times 10^{-3} \exp\left(\frac{-53800}{RT}\right) \quad (4)$$

A diferença entre os coeficientes no ferro α e no ferro γ pode ser explicada pela sua dependência da estrutura cristalina. Pode-se notar que o coeficiente de difusão do hidrogênio é menor no ferro γ para uma mesma temperatura, devido à sua estrutura mais compacta.

3.2.4. A fragilidade pelo hidrogênio

O hidrogênio é muito mais solúvel na fase líquida que na fase sólida do aço^[5]. Ele terá, portanto, a tendência de se concentrar na fase líquida durante a solidificação do lingote. As últimas zonas solidificadas serão então enriquecidas em hidrogênio, e o lingote apresentará picos de grande concentração em hidrogênio.

O mesmo comportamento é observado durante o resfriamento do aço na fase sólida. O hidrogênio é mais solúvel na austenita e se concentrará nas zonas segregadas, enriquecidas em elementos de liga, para as quais a transformação acontecerá a uma temperatura menor.

Estes picos de concentração de hidrogênio podem gerar defeitos tais quais ^[4]:

- Flocos;
- “Olho de peixe”;
- Fissuras de segregação;
- Fratura diferenciada;
- Propagação de fissuras (o hidrogênio pode favorecer a propagação dos defeitos pré-existentes).

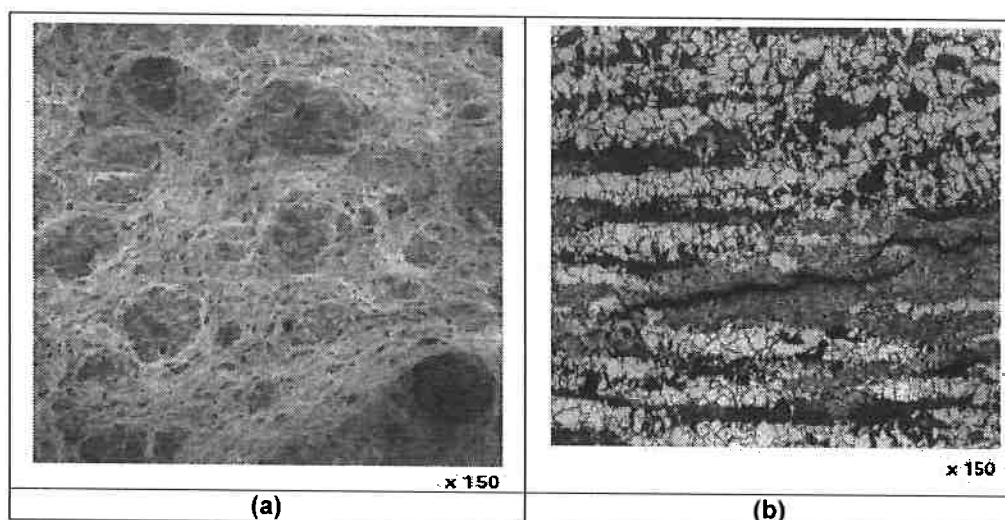


Figura 8: Defeitos induzidos pelo hidrogênio – olho de peixe (a) e fissuras de segregação (b) ^[4].

Em todos os casos, uma das técnicas usadas para evitar estes defeitos é reduzir a concentração de hidrogênio do aço na panela de metal líquido, o que é feito a partir de procedimentos industriais de degaseificação. Mesmo se a placa for submetida a este procedimento na aciaria, ainda resta hidrogênio dissolvido no lingote e, conseqüentemente, na placa laminada. Este gás, mesmo a uma concentração relativamente baixa (1 ppm), pode originar, para certas composições de aço, fissuras internas e evolutivas nas placas resfriadas até a temperatura ambiente. Torna-se necessário, para certos tipos de aços, uma outra etapa de desidrogenação, já no estado sólido.

Esta outra etapa pode ser feita através de um resfriamento lento da placa no estado sólido, proporcionando condições cinéticas suficientes para a difusão do hidrogênio dentro da placa. Em algumas indústrias, como a Industeel Loire, a temperatura da placa é mantida após a laminação para garantir a sua desidrogenação.

3.3. Transporte de calor e de hidrogênio em placas de aço

3.3.1. Transporte de calor

A evolução da temperatura de um sistema físico sólido e opaco é o resultado da competição entre o fenômeno da condução e da geração do calor interno, sob condições definidas na fronteira, seja em função da troca térmica (radiação, condução, convecção), seja em função de uma temperatura imposta.

Esta evolução é representada pela seguinte equação diferencial baseada no princípio de conservação de energia ^[12]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} T) + \dot{W} \quad (5)$$

↓ Evolução da temperatura
 ↓ Condução Interna
 ↓ Geração Interna

O fenômeno de geração interna de calor ($\dot{W}$) utilizado nesta equação é normalmente resultado da deformação plástica, que não é considerada neste trabalho. Esta geração será, portanto, considerada nula.

A resolução da equação (5) envolve a definição de condições de contorno, que podem ser prescritas na forma de um fluxo de calor na superfície por radiação ou convecção para o meio externo.

O fluxo de calor por radiação (q_r) pode ser definido pela equação abaixo:

$$q_r = \sigma * \varepsilon * (T^4 - T_0^4) \quad (6)$$

onde ε é a emissividade do material em condições estabelecidas (ambiente, temperatura, etc.); σ é a constante de Stefan-Boltzmann; T_0 é a temperatura do meio externo e T é a temperatura do sólido na superfície.

O fluxo de calor por condução (q_c) pode ser definido pela equação:

$$q_c = h * (T - T_0) \quad (7)$$

onde h é o coeficiente de troca de calor entre a superfície da placa e o meio externo.

3.3.2. Transporte de hidrogênio no aço

A difusão de hidrogênio no metal sólido é regida pela segunda lei de Fick, descrita abaixo ^[12]:

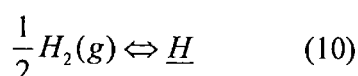
$$\frac{\partial C}{\partial t} = \bar{\nabla} \cdot (D \bar{\nabla} C) \quad (8)$$

onde c é a concentração de hidrogênio e D é o coeficiente de difusão do hidrogênio no sólido.

O coeficiente de difusão do hidrogênio no aço segue a lei de Arrhenius:

$$D = D_0 * \exp\left(-\frac{\alpha}{T}\right) \quad (9)$$

Condições de contorno para resolução da equação (9) também devem ser definidas. Geralmente, estas condições são prescritas conhecendo-se a concentração de hidrogênio na superfície, que pode ser dada através da Lei de Sievert, segundo o equilíbrio abaixo:



onde $\underline{H}$ é o hidrogênio dissolvido no aço sólido. A constante termodinâmica desta reação é:

$$K = \frac{a_H}{(a_{H_2})^{\frac{1}{2}}} \quad (11)$$

onde a_H é a atividade do hidrogênio no metal sólido, e a_{H_2} é a atividade do hidrogênio no gás.

Se considerarmos uma solução sólida diluída, $a_H \cong c_H$ e $a_{H_2} \cong p_{H_2}$, onde C_H é a concentração de hidrogênio no sólido e p_{H_2} é a pressão parcial do gás hidrogênio.

Logo, a relação acima torna-se:

$$K = \frac{c_H}{(p_{H_2})^{\frac{1}{2}}} = K_o \exp\left(\frac{-\beta}{T}\right) \quad (12)$$

onde K_0 e β são constantes. Finalmente, a concentração de hidrogênio(ou solubilidade de hidrogênio) na superfície pode ser calculada por:

$$C_H = K_0 * \exp\left(-\frac{\beta}{T}\right) * (p_{H_2})^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

4. Materiais e Métodos

O presente trabalho envolveu uma etapa de coleta de dados experimentais (item 4.1) e uma modelagem matemática (item 4.2) do tratamento de desidrogenação de placas grossas de aço produzidas na usina de Châteauneuf, França. No item 4.1.1, o processamento dos lingotes será descrito. Uma análise dos dados disponíveis na usina será apresentada no item 4.1.2 para a escolha do tipo dos aços a serem estudados. O item 4.1.3 apresentará as etapas do processamento das placas que serão estudadas. Os procedimentos para as medidas de temperatura nas placas serão descritos no item 4.1.4.

O item de modelagem matemática (4.2) tem início com a apresentação das equações utilizadas (item 4.2.1), seguido do procedimento utilizado para solucionar estas equações (item 4.2.2). No item 4.2.3, serão descritos os procedimentos utilizados para a obtenção dos parâmetros necessários para definir a transferência de calor entre a placa e o ar ou Fraasil e as propriedades do Fraasil. Finalmente, as condições de simulação são apresentadas no item 4.2.4.

4.1. Procedimentos Experimentais

4.1.1. Processamento dos lingotes em Châteauneuf

a) Processo de fabricação

O processo de fabricação de placas espessas na usina de Châteauneuf é baseado nas seguintes operações descritas na Figura 9:

1. O aço é elaborado no forno elétrico a partir de sucata cuidadosamente selecionada.
2. O refinamento do aço líquido é feito na panela aquecida, seguido por uma desgazeificação no processo RH.
3. O aço é vazado na lingoteira.

4. O aquecimento e a laminação dos lingotes são controlados pelo computador e asseguram uma taxa de deformação adequada da microestrutura.
5. Os produtos mais espessos (≥ 200 mm) são pré-forjados antes da laminação.
6. As placas são então laminadas a quente até a espessura desejada.
7. As placas passam por tratamentos térmicos ou por um ciclo de resfriamento ao ar e no Fraissil.
8. O controle de qualidade, os cortes e o acabamento são realizados nas placas.

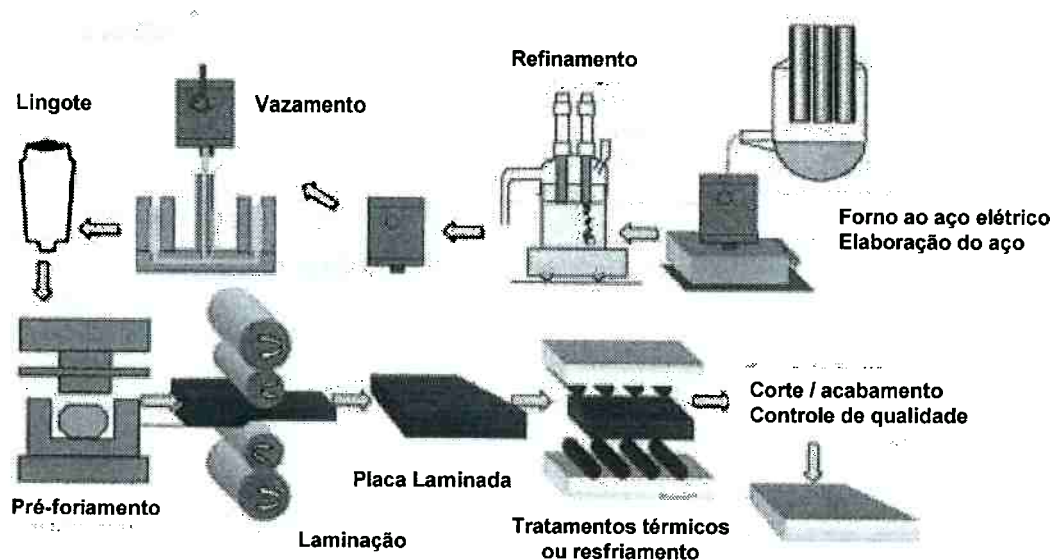


Figura 9: Esquema do processo de fabricação de placas de Industeel Loire.

As operações de aquecimento e de conformação a quente dos lingotes obedecem a normas que variam em função das dimensões da placa após laminação e acabamento, da lingoteira usada para a fabricação do lingote e do tipo de aço.

O esquema seguinte resume as operações de conformação e resfriamento às quais os lingotes são submetidos. Tais operações, que estão indicadas na Figura 9, serão estudadas neste trabalho.

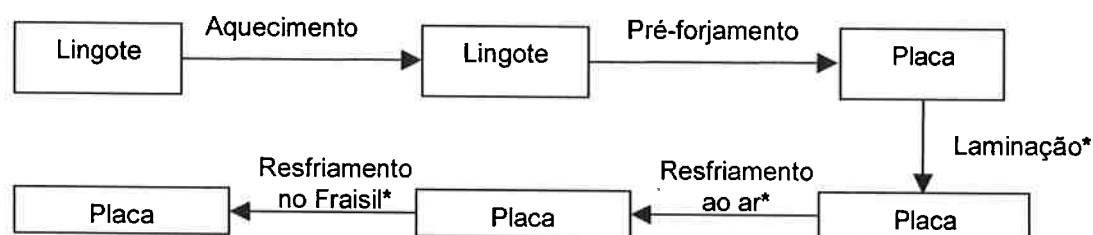


Figura 10: Operações sofridas pelo lingote bruto da aciaria. (*) = Etapas estudadas neste trabalho.

b) Aquecimento e Conformação

O aquecimento dos lingotes é feito em fornos a gás e a uma temperatura de cerca de 1300 °C. Este aquecimento é sempre feito antes que o lingote seja pré-forjado. Um aquecimento adicional das placas pode ser feito após o pré-forjamento (antes da laminação) para certos lingotes (casos isolados). Este aquecimento é feito a 1250 °C.

A usina de Châteauneuf possui uma prensa e um laminador em linha, o que permite o ganho de tempo entre essas duas operações. Em relação aos aços para a construção de moldes, as placas que possuem uma espessura maior ou igual a 200 mm são sempre pré-forjadas e em seguida laminadas.

c) Resfriamento

Na Industeel Loire, um segundo tratamento de desidrogenação é realizado no aço sólido, durante o resfriamento após laminação. Este resfriamento tem o objetivo de permitir a difusão do hidrogênio para o ambiente e também a homogeneização do teor de hidrogênio na peça. Devido ao seu pequeno tamanho, o hidrogênio pode se movimentar mais facilmente na estrutura do aço, difundindo-se para fora da placa. Quanto maior a temperatura da placa, mais fácil será a difusão do hidrogênio, contanto que a transformação da austenita seja realizada, pois o hidrogênio apresenta uma alta solubilidade e, conseqüentemente, menor difusão nesta fase.

A transformação da austenita em ferrita ocorrerá de duas formas: seja resfriando a placa continuamente, ou através de um repouso prolongado a uma dada temperatura. Uma mesma composição de aço pode conservar a austenita até 300°C durante um resfriamento contínuo ou sofrer uma transformação total da austenita a uma temperatura constante de 600°C.

É preciso saber que :

- O hidrogênio é dezenas de vezes mais solúvel na austenita que na ferrita;
- Ele difunde milhares de vezes mais rápido na ferrita que na austenita;
- O hidrogênio difunde cerca de 4 vezes mais a 600°C que a 300°C;
- Se houver a presença simultânea de austenita e de ferrita, o hidrogênio difundirá da ferrita para a austenita, que se enriquecerá e poderá apresentar uma concentração maior que a concentração crítica em hidrogênio.

O repouso à temperatura adequada deverá ser suficientemente longo para permitir a difusão do hidrogênio situado no centro da placa em direção ao ambiente.

Após a laminação e o resfriamento ao ar, a Industeel utiliza uma técnica especial de resfriamento de placas, chamada de "Fraisil", para evitar tensões internas causadas pela diferença de transformação microestrutural entre o centro e a superfície da placa, e para fornecer condições cinéticas suficientes para a difusão de hidrogênio na placa. O resfriamento no Fraisil (Figura 11) consiste em resfriar a placa lentamente e uniformemente, uma vez que a transformação austenita-ferrita foi realizada. Desta maneira, o hidrogênio irá difundir-se da fase α para o ambiente com um coeficiente de difusão otimizado (a temperatura diminuirá lentamente). Nesta técnica, as placas são colocadas em um leito de rochas vulcânicas isolantes para permitir um resfriamento quase isotérmico.



Figura 11: O Fraisil na usina de Châteauneuf.

As vantagens deste procedimento são:

- Ele permite a transformação completa da austenita e, assim, evita uma microestrutura frágil na placa;
- Ele possibilita a desgazeificação de placas e evita os defeitos ligados ao hidrogênio;
- Possui um custo menor em comparação aos fornos de desgazeificação.

Por outro lado, o Fraisil também possui efeitos negativos:

- É um meio pesado e poluente (poeira);
- Ele precisa de espaço;
- Ele aumenta o tempo de processamento.

O resfriamento de placas após laminação na usina de Châteauneuf é constituído de duas etapas: o resfriamento ao ar e o resfriamento no Fraisil. A primeira etapa tem o objetivo de transformar a austenita em ferrita (e/ou perlita, e/ou bainita), microestrutura na qual a difusão de hidrogênio é importante. Este resfriamento não é feito no Fraisil, pois a empresa quer otimizar o tempo total de resfriamento das placas. A segunda etapa permite o resfriamento bem lento da estrutura ferrítica (ou perlítica ou bainítica), evitando a microsegregação e a

concentração de microtensões, e para maximizar a difusão do hidrogênio presente na placa.

As normas de resfriamento utilizadas na usina de Châteauneuf foram pesquisadas para os aços que serão estudados, e para as placas cuja espessura varia entre 200mm e 700mm. Além disso, a concentração de hidrogênio na panela deve ser menor ou igual a 1.2 ppm, como será descrito no item 4.2. Essas normas são mostradas na tabela abaixo e no Anexo 2.

Tabela 1: Normas de resfriamento, usadas na usina de Châteauneuf, para os aços SP300 e SP400.

Aços : SP300 e SP400			
Espessura (mm)	Sigla do Procedimento	Tempo de resfriamento ao ar	Tempo no Fraisil
200	AU	Ilimitado	0
250	AU	Ilimitado	0
300	AU	Ilimitado	0
350	AU	Ilimitado	0
400	AUF5	4h30	5 dias
450	AUF5	6h30	5 dias
500	AUF5	6h30	5 dias
550	AUF5	8h30	5 dias
600	AUF5	8h30	5 dias
650	AUF5	8h30	5 dias
700	AUF5	8h30	5 dias
750	AUF10	9h30	10 dias

4.1.2. Definição dos aços estudados

Alguns dados de produção da usina de Châteauneuf foram recuperados com o programa de acompanhamento de produção da usina, chamado de Prisme SPR®. O objetivo desta parte do projeto é analisar a situação atual do resfriamento de placas (onde ocorre a desidrogenação) de diferentes composições de aço, para depois dimensionar corretamente este problema.

As placas de aço líquido e os lingotes de aço foram classificados segundo o seu teor de hidrogênio, durante o período de 2003 a 2005. Os resultados estão apresentados na Figura 12.

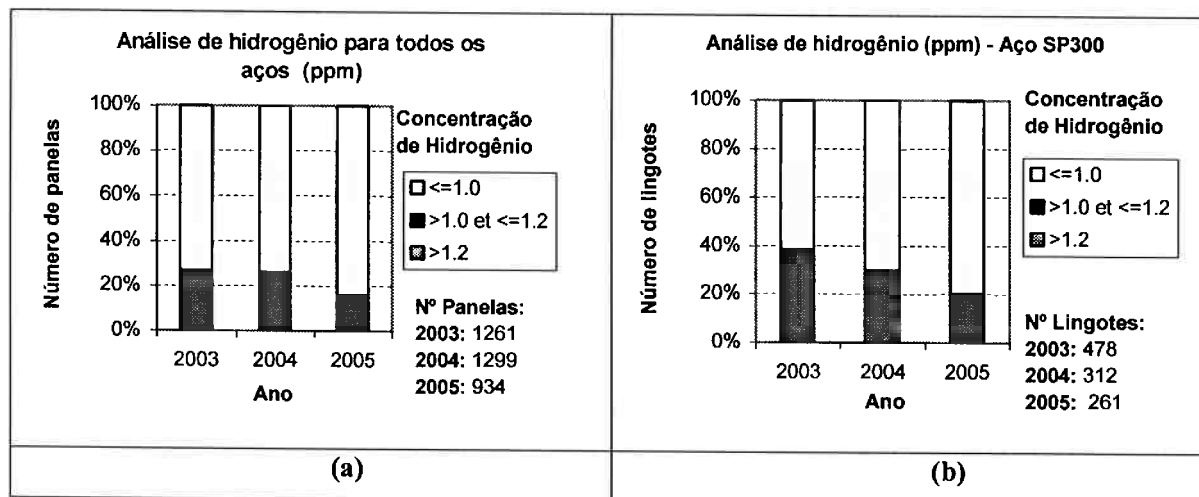


Figura 12: Análise de hidrogênio dos aços produzidos entre os anos 2003 e 2005. Todos os aços (a) e aço SP300 (b).

A Figura 12 mostra que os casos mais comuns são aqueles onde a concentração do hidrogênio na placa é menor ou igual a 1,2 ppm (95% das placas em 2005). Analisando o caso específico do aço SP300, os resultados são muito próximos dos obtidos para todos os tipos de aço. Logo, as análises de dados e o modelamento matemático serão feitos para as placas cuja concentração máxima de hidrogênio é de 1.2 ppm.

Em seguida, um estudo do tempo despendido no Fraisl foi feito para os anos de 2003 a 2005 de acordo com o número de lingotes que foram submetidos a este tratamento. Os dados foram recuperados com a ajuda do programa Business Object® e passaram por uma triagem para serem analisados.

A determinação do tempo de resfriamento no Fraisl é feita durante o processo de pedido do produto, segundo as normas de resfriamento da usina. As operações, incluindo o tratamento no Fraisl, são programadas de acordo com as características finais do produto. A Tabela 2 mostra o tempo de resfriamento no Fraisl (número de dias determinado durante o pedido) para todos os lingotes que foram submetidos a este tratamento durante o período de 2003 a 2005.

Tabela 2: Situação da ocupação do Fraasil para os anos de 2003 a 2005.

Tempo de resfriamento no Fraasil	Número de lingotes					
	2003	2003 (%)	2004	2004 (%)	2005	2005 (%)
1 dia	63	3,2	50	3,3	38	2,5
2 dias	34	1,7	12	0,8	92	6,0
3 dias	516	26,2	463	30,6	316	20,7
4 dias	138	7,0	234	17,5	113	7,4
5 dias	804	40,8	454	30,0	526	34,4
6 dias	121	6,1	88	5,8	154	10,1
8 dias	161	8,2	128	8,5	124	8,1
10 dias	80	4,0	82	5,4	164	10,7
Total de lingotes	1917	100	1511	100	1527	100

Pode-se ver que a programação do Fraasil é feita principalmente para uma duração de 3 ou 5 dias. O número total de lingotes diminuiu significativamente em 2004, mas apresentou uma ligeira alta em 2005. O número de lingotes que ficaram no Fraasil por 10 dias em 2005 aumentou de 100% em relação aos anos anteriores, enquanto que os pedidos para uma duração de 3 dias diminuíram cerca de 39% entre 2003 e 2005. Logo, o período de 5 dias no Fraasil será analisado mais detalhadamente nos próximos parágrafos.

Para melhor escolher os tipos de aço que serão estudados neste trabalho, duas outras análises foram feitas: a classificação dos tipos de aço pelo número de lingotes e pelo tempo de resfriamento no Fraasil (neste caso, 5 dias de duração). Os tipos de aço que ocupam o Fraasil foram classificados pelo número de lingotes, com pode ser visto na Tabela 3 e na Figura 13.

Tabela 3: Número de lingotes dos tipos de aços mais utilizados no Fraisil.

Aço	2003	2004	2005
AISI P20	6.7%	3.1%	0.0%
MP33+SP300	16.5%	10.7%	15.5%
W.1.2085	0.0%	2.8%	7.9%
W.1.2311	5.5%	5.3%	7.1%
W.1.2312	3.7%	2.3%	1.8%
W.1.2738	7.2%	3.4%	3.5%
W.1.2738HH	1.7%	5.4%	1.6%
SA 299	8.5%	10.5%	4.8%
Total de lingotes	1924	1509	1535

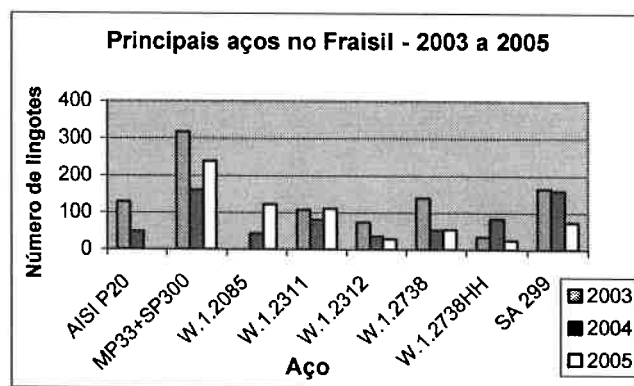


Figura 13: Tipos de aços no Fraisil - 2003 a 2005.

A Figura 14 mostra a situação para os pedidos com duração de Fraisil de 5 dias (alta demanda).

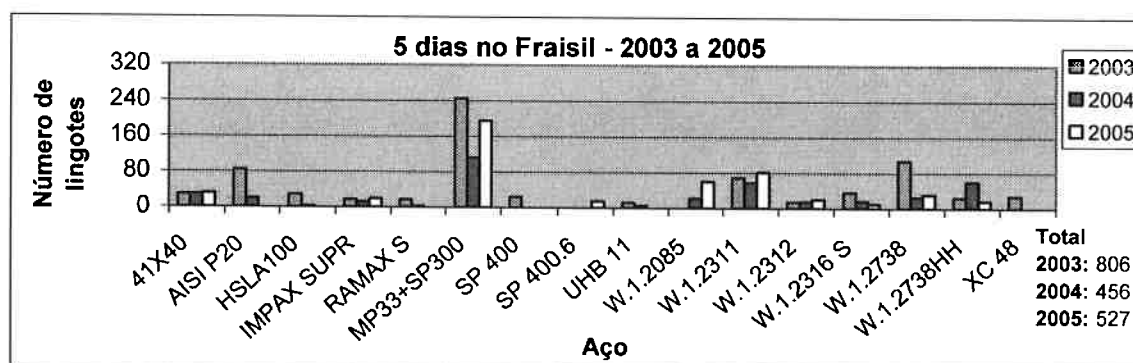


Figura 14: Resfriamento de aços no Fraisil durante 5 dias – distribuição por tipo de aço.

Após a análise dos gráficos e tabelas apresentados, foram escolhidos os tipos de aço para o presente estudo. Os tipos de aço escolhidos foram aqueles utilizados para a construção de moldes de injeção de plástico: o aço SP300 (e MP33) é o que mais ocupa o Fraisil; o aço SP400, que possui uma composição próxima do SP300, e que se encontra em pleno desenvolvimento; e os aços DIN W.1.2311, W.1.2312, e W.1.2738, que ocupam uma boa parte do “Fraisil 5 dias”. Uma tabela que contém os tipos de aço produzidos pela usina de Châteauneuf e suas composições consta no Anexo 1.

4.1.3. Processamento dos aços estudados

Algumas placas foram selecionadas para a realização das medidas de temperatura descritas no item 4.1.4. A Tabela 4 mostra as propriedades e condições de processamento destas placas.

Tabela 4: Placas submetidas à campanha de medidas de temperatura.

Nº	Aço	Comprimento ¹	Largura ¹	Espessura ₁	Aquecimento para forjamento	Aquecimento para laminação
1	SP300	5271 mm	2132 mm	757 mm	1300 °C	1250 °C
2	SP300	5916 mm	2070 mm	424 mm	1300 °C	Não
3	SP300	3085 mm	2038 mm	490 mm	1300 °C	Não
4	SP300	4030 mm	2068 mm	596 mm	1300 °C	Não
5	SP300	5920 mm	2070 mm	480 mm	1300 °C	Não
6	SP300	4238 mm	2018 mm	761 mm	1300 °C	Não
Nº	Resfriamento ao ar	Fraisil	Tempo ²	Temperatura ³	Medidas Fraisil ⁴	Medidas Ar ⁵
1	10h30	5 dias	19 min	870 °C	Sim	Não
2	6h30	5 dias	33 min	890 °C	Sim	06h07
3	6h30	5 dias	27 min	890 °C	Não	03h48
4	8h30	5 dias	44 min	885 °C	Não	08h30
5	Ilimitado ⁶	Não	36 min	870 °C	Não	03h09
6	9h30	10 dias	29 min	870 °C	Não	03h03

(1) = Dimensões após laminação.

(2) = Tempo entre a saída do forno de aquecimento e o final da laminação

(3) = Temperatura no final da laminação.

(4) = Indica se a placa foi submetida à campanha de medidas de temperatura durante o resfriamento no Fraisil.

(5) = Indica se a placa foi submetida à campanha de medidas de temperatura durante o resfriamento ao ar.

(6) = A placa foi submetida apenas ao resfriamento ao ar.

As simulações realizadas para a otimização do resfriamento na usina de Châteauneuf, França, utilizaram placas cujas propriedades são mostradas na Tabela 5. As dimensões apontadas são aquelas obtidas após as operações de conformação, resfriamento e acabamento.

Tabela 5: Propriedades das placas utilizadas nas simulações de otimização do resfriamento.

Largura (mm)	Espessura (mm)	Aços				Concentração do hidrogênio inicial (ppm)
2300	200 a 750 mm, a cada 50 mm	SP300 SP400	AISI P20	DIN W.1.2738	DIN W.1.2311 W.1.2312	1.2

As placas estudadas possuem 2300 mm de largura e uma espessura que varia entre 200 e 750 mm, após conformação a quente e acabamento. As dimensões após laminação foram determinadas segundo as seguintes condições:

Largura após laminação: 2400 mm

Espessura após laminação (e'):

- Se a espessura após acabamento ≤ 400 mm; $e' = e + 10$ mm.
- Se a espessura após acabamento > 400 mm e ≤ 600 mm; $e' = e + 15$ mm.
- Se a espessura após acabamento > 600 mm; $e' = e + 19$ mm.

As propriedades físicas e térmicas dos aços citados na tabela acima podem ser encontradas no Anexo 3.

4.1.4. Medidas de temperatura

Uma campanha de medidas de temperatura foi realizada com o objetivo de determinar:

- Os coeficientes de transporte de calor entre a placa e o ar durante a laminação e o resfriamento ao ar;
- O coeficiente de transporte de calor entre a placa e o Fraasil;
- O coeficiente de transporte de calor entre o Fraasil e o ar e as propriedades termofísicas do Fraasil.

A utilização destas medidas será apresentada no item 4.2.3.

Primeiramente, foram feitas medidas de temperatura da superfície superior das placas em resfriamento ao ar, com a ajuda de um pirômetro óptico. A Figura 15 mostra a posição das medidas.

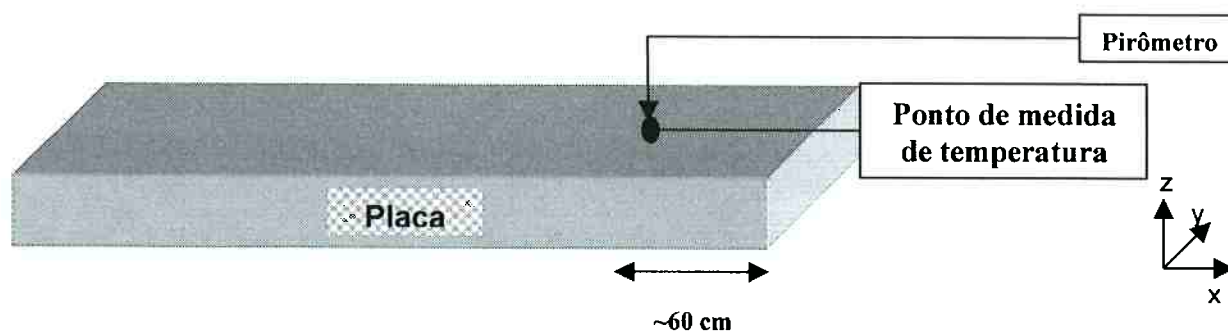


Figura 15: Esquema indicando os locais das medidas de temperatura nas placas, durante resfriamento ao ar.

Em seguida, as temperaturas foram também medidas no Fraisl. Dois termopares tipo K medindo a temperatura continuamente foram colocados: um na superfície da placa e o outro no Fraisl, acima da placa. A Figura 16 mostra a posição dos termopares.

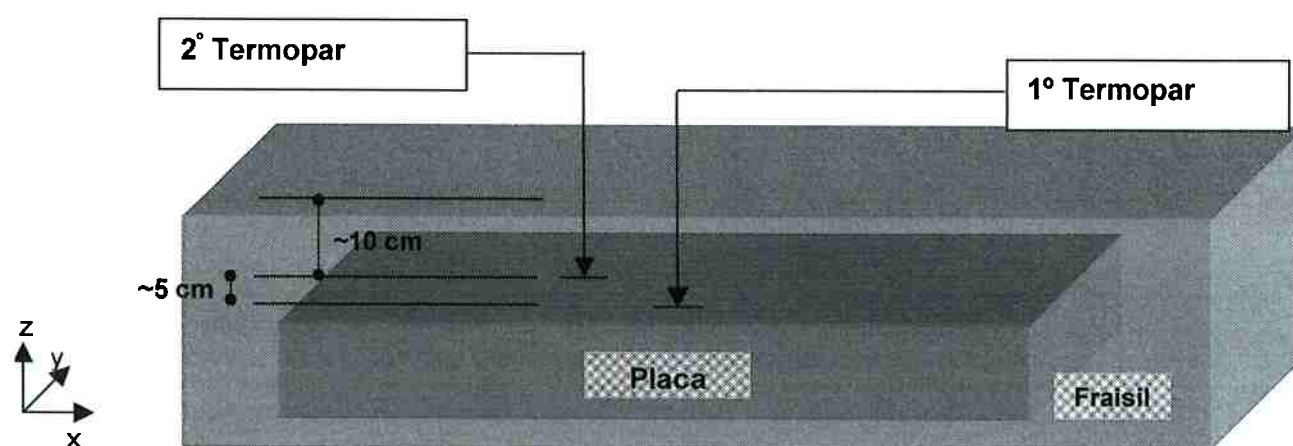


Figura 16: Esquema indicando o posicionamento dos termopares durante a campanha de medidas de temperatura no Fraisl.

4.2. Simulação Matemática

4.2.1. Modelo Matemático

O modelo matemático do resfriamento de placas espessas consiste de um modelo para a transferência de calor e outro para a difusão de hidrogênio no aço. Esse modelos serão detalhados a seguir.

a) Transferência de calor em placas de aço

O modelo matemático de transferência de calor no interior de uma placa e do Fraasil pode ser descrito para as etapas de conformação a quente, de resfriamento ao ar e de resfriamento no Fraasil.

Seja a placa simulada representada pela Figura 17 e o Fraasil pela Figura 18.

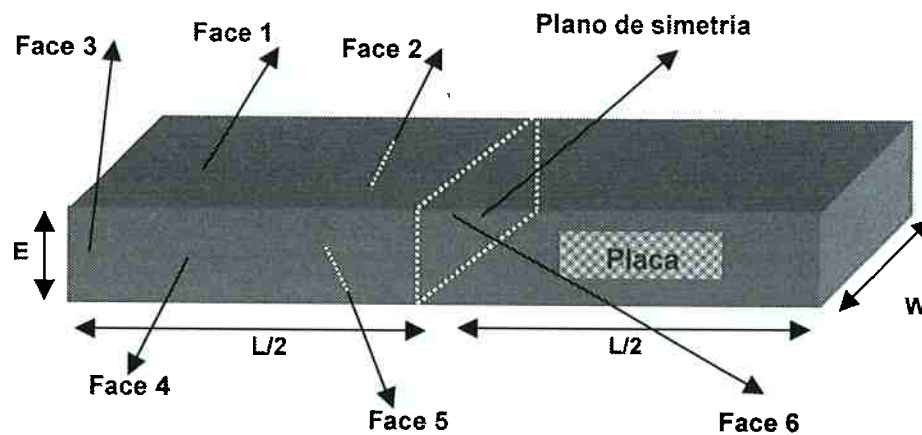


Figura 17 : Indicação de eixos, superfícies e domínio de cálculo da placa estudada, onde E, L e W indicam a espessura, o comprimento e a largura da placa, respectivamente.

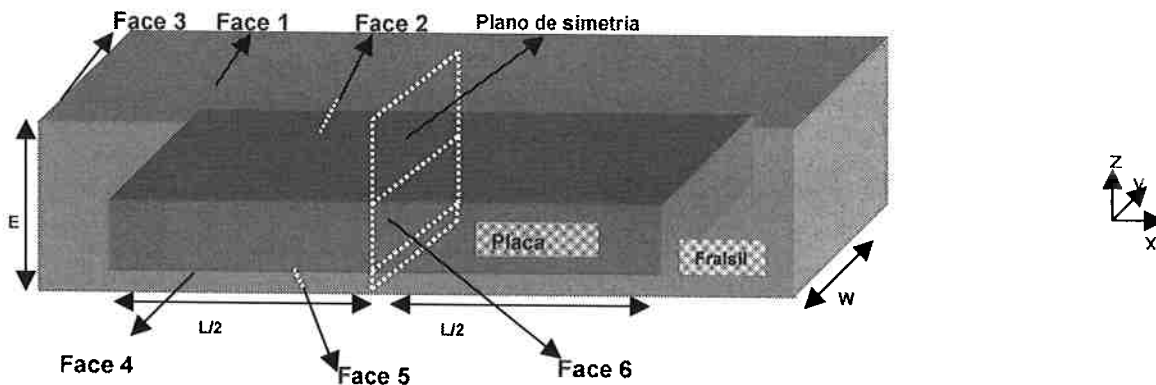


Figura 18 : Indicação de eixos, superfícies e domínio de cálculo da placa estudada, onde E, L e W indicam a espessura, o comprimento e a largura da placa, respectivamente.

As condições iniciais e de contorno são descritas para as três etapas que serão estudadas: conformação a quente, resfriamento ao ar e resfriamento no Fraisil.

i) Laminação

A seguinte equação foi utilizada para modelar o transporte de calor nas placas de aço durante a etapa de conformação a quente:

$$\rho_p C p_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (k_p \vec{\nabla} T_p) \quad (14)$$

onde:

- ρ_p densidade da placa
- $C p_p$ calor específico da placa
- T_p temperatura da placa
- t tempo
- k_p condutividade térmica da placa

Condição inicial

A temperatura inicial $T = T_i$ é caracterizada pela saída do lingote do forno de aquecimento. Temos então que T_i é a temperatura no lingote quando este é retirada

do forno. Esta temperatura é homogênea, pois o lingote é aquecido durante um tempo suficiente longo para a equalização da temperatura em todos os seus pontos.

Condições de contorno

Fluxos de calor por radiação (q_r) e convecção (q_c) são definidos como condição de contorno nas faces 1 a 5, enquanto que uma condição de simetria é definida na face 6.

Nas faces 1 a 5, temos que o fluxo total de calor (q), é a soma dos fluxos de calor oriundos dos fenômenos de radiação (q_r), e de convecção (q_c):

$$q = q_r + q_c \quad (15)$$

O fluxo de radiação é descrito pela seguinte equação:

$$q_r = \sigma * \varepsilon_p * (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (16)$$

onde ε_p é a emissividade da placa em condições estabelecidas (ambiente, temperatura, etc.); σ é a constante de Stefan-Boltzmann; T_∞ é a temperatura do meio externo e T_p é a temperatura do sólido na superfície.

O fluxo de convecção é dado pela seguinte equação:

$$q_c = h_{Lpa} * (T_p - T_\infty) \quad (17)$$

onde h_{Lpa} é o coeficiente de transporte de calor entre a placa e o ambiente (ar), durante a etapa de conformação a quente.

Na face 6, o plano de simetria, temos que $\partial T / \partial x = 0$, logo, $q=0$.

ii) Resfriamento ao ar

Igualmente ao item (a), a equação (14) foi empregada no modelamento da etapa de resfriamento ao ar.

Condição inicial

O perfil inicial de temperatura da placa é igual ao perfil de temperatura no final da etapa de conformação a quente.

Condições de contorno

As condições de contorno são calculadas nas interfaces placa-ambiente (superfícies 1 a 6).

Nas faces 1 a 5, temos que o fluxo total de calor (q), é a soma dos fluxos de calor oriundos dos fenômenos de radiação (q_r), e de convecção (q_c), como descrito na equação 15.

O fluxo de radiação é descrito pela equação 16 e o fluxo de convecção é dado pela seguinte equação:

$$q_c = h_{Rpa} * (T_p - T_\infty) \quad (18)$$

onde h_{Rpa} é o coeficiente de transporte de calor entre a placa e o ambiente (ar), durante a etapa de resfriamento ao ar.

Na face 6, o plano de simetria, temos que $\partial T / \partial x = 0$, logo, $q = 0$.

iii) Resfriamento no Fraislil

O resfriamento no Fraislil é modelado no interior da placa e do Fraislil segundo as seguintes equações:

$$\text{Placa:} \quad \rho_p C_{p_p} \frac{\partial T_p}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (k_p \vec{\nabla} T_p) \quad (14)$$

$$\text{Fraisil} \quad \rho_F C_{p_F} \frac{\partial T_F}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (k_F \vec{\nabla} T_F) \quad (19)$$

onde:

ρ_F	densidade do Fraislil
C_{p_F}	calor específico do Fraislil
T_F	temperatura do Fraislil
t	tempo
k_F	condutividade térmica do Fraislil

Condições iniciais

Placa: o perfil inicial de temperatura da placa é igual ao perfil de temperatura da placa no final da etapa resfriamento ao ar.

Fraisil: a temperatura inicial do Fraisil $T=T_i$ é uniforme.

Condições de contorno

As condições de contorno são calculadas nas interfaces placa-Fraisil e Fraisil-ambiente (superfícies 1 a 5), e no plano de simetria (face 6).

Nas faces 1 a 5 da placa, temos que o fluxo total de calor (q), é a soma dos fluxos de calor oriundos dos fenômenos de radiação (q_r), e de convecção (q_c), como descrito na equação 15.

O fluxo de radiação na placa é descrito pela seguinte equação:

$$q_r = \sigma * \varepsilon_p * (T_p^4 - T_F^4) \quad (20)$$

O fluxo de convecção na placa é dado pela seguinte equação:

$$q_c = h_{PF} * (T_p - T_F) \quad (21)$$

onde h_{PF} é o coeficiente de transporte de calor entre a placa e o Fraisil, durante a etapa de resfriamento no Fraisil.

Na face 6 da placa, o plano de simetria, temos que $\partial T / \partial x = 0$, logo, $q=0$.

Nas faces 1 a 5 do Fraisil, temos que o fluxo total de calor (q) é igual ao fluxo de calor oriundo do fenômeno de convecção (q_c).

O fluxo de convecção no Fraisil é dado pela seguinte equação:

$$q_c = h_{Fa} * (T_F - T_\infty) \quad (22)$$

onde h_{PF} é o coeficiente de transporte de calor entre o Fraisil e o ambiente (ar), durante a etapa de resfriamento no Fraisil.

Na face 6 do Fraisil, o plano de simetria, temos que $\partial T / \partial x = 0$, logo, $q=0$.

b) Transferência de hidrogênio em placas de aço

Segundo o item 3.4, utilizou-se a seguinte equação que descreve a difusão de hidrogênio nas placas de aço durante as etapas de conformação a quente, resfriamento ao ar e resfriamento no Fraissil (2ª Lei de Fick):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla C) \quad (8)$$

Condições iniciais

A concentração do hidrogênio no lingote de aço no início da sua conformação a quente é a mesma concentração do hidrogênio na panela de aço líquido ($C_H = C_{Hi}$). Esta concentração será considerada uniforme em todo o lingote, para facilitar os cálculos, apesar da existência de segregação.

Condições de contorno

A difusão de hidrogênio será feita para a superfície, que possui uma concentração em hidrogênio em equilíbrio com uma pressão parcial de hidrogênio constante no ar ao redor. A concentração a cada instante na superfície da placa será caracterizada pela sua solubilidade no aço ($C_H = C_{HS}$). Logo, adotou-se uma condição de contorno de concentração prescrita nas faces 1 a 5.

Na face 6, adotou-se a condição de simetria: $\frac{\partial C}{\partial x} = 0$.

Escolhas dos coeficientes de difusão e de solubilidade

Os coeficientes de difusão (D) e de solubilidade (C_{HS}) do hidrogênio em um aço para construção de moldes de injeção de plástico foram determinados a partir de um estudo feito no CRMC e publicado em 2005 [2]. Este trabalho tinha o objetivo de estudar a fragilidade pelo hidrogênio do tipo nos aços do tipo 2.25Cr-1Mo. As

equações que caracterizam esses coeficientes são apresentadas na página seguinte:

$$\text{Fase } \alpha : D = 2.4 * 10^{-3} \exp\left(-\frac{2132}{T}\right) \quad (23) \quad C_{HS} = 33 * \exp\left(-\frac{3333}{T}\right) * p_{H_2}^{\frac{1}{2}} \quad (24)$$

$$\text{Fase } \gamma : D = 7.1 * 10^{-4} \exp\left(-\frac{4555}{T}\right) \quad (25) \quad C_{HS} = 8.93 * \exp\left(-\frac{650}{T}\right) * p_{H_2}^{\frac{1}{2}} \quad (26)$$

Onde D está expresso em cm^2/s , C_{HS} , em $\text{ppm} \cdot \text{bar}^{1/2}$, e a temperatura T em K.

4.2.2. Resolução das equações do modelo

O estudo da transferência de calor nas placas durante as operações de conformação e resfriamento pode ser separado em 3 etapas:

1. Conformação a quente dos lingotes.
2. Transferência da placa entre o laminador e o Fraisil e resfriamento ao ar.
3. Resfriamento lento no Fraisil.

A primeira etapa é a combinação do fluxo térmico em direção ao meio-ambiente e o aquecimento do lingote devido à sua deformação plástica. A segunda é um resfriamento simples das placas ao ar e a terceira é um resfriamento em meio poroso (ar + rochas isolantes), onde a temperatura neste meio varia com o tempo.

A análise numérica deste problema é possível e simples para placas muito finas submetidas a um estado estacionário (o fluxo de calor é assumido unidirecional). No entanto, este projeto tem o objetivo de modelar o resfriamento de placas espessas submetidas a um estado transitório. Como a resolução das equações deste caso é complicada, elas serão solucionadas pelo método dos elementos finitos, através de um software comercial.

O software utilizado para a simulação numérica chama-se Forge®_2005, módulo 2D. Ele efetua simulações em 2 dimensões baseadas nos elementos finitos. As equações serão solucionadas em 2 dimensões, pois o fluxo de calor na direção longitudinal da placa pode ser considerado desprezível em relação ao fluxo nas outras direções.

Forge_2005®

Forge®_2005 é uma ferramenta de simulação baseada no método dos elementos finitos. Ele foi desenvolvido pelo CEMEF (Centre de Mise en Forme des Matériaux) e comercializado pela sociedade Transvalor S.A., e permite o modelamento dos processos de conformação mecânica a quente, a morno ou a frio, e dos tratamentos térmicos em 2 ou 3 dimensões.

Este programa é composto de 3 blocos:

- Um bloco pré-processador, que é dividido em 2 subprogramas: Qcad e GLPre. Qcad é um programa de CAD 2D que possibilita a criação dos contornos da peça que será modelada. GLPre gera o conjunto de arquivos necessários para o funcionamento das simulações (arquivo de malha e de ferramental, arquivo de dados). Ele é baseado no conceito de modelos pré-definidos (por exemplo, forjamento a quente, têmpera, resfriamento em 2 dimensões) e pode criar várias simulações no mesmo projeto.
- Um bloco processador (Solver), que efetua o cálculo a partir do arquivo de dados criado pelo GLPre.
- Um bloco pós-processador, que consiste em 1 programa, GLView Inova, que permite a exploração do cálculo e o traçado dos isovalores dos resultados ou das evoluções em todos os pontos da peça.

O lançador de soluções Transvalor utilizado para as simulações em Forge2005®_ em 2D e em 3D é mostrado na Figura 19.



Figura 19: Lançador de soluções Transvalor.

a) Funcionamento

Para um modelamento no programa Forge®_2005, deve-se realizar os seguintes procedimentos:

- Primeiramente, é preciso desenhar os contornos da peça com as suas reais dimensões no Qcad.
- Em seguida, GLPre chama este arquivo e, agrupando as características do material, os parâmetros de malha, as condições iniciais e limites e os parâmetros do cálculo, gera um arquivo de dados da simulação.
- O Solver chama este arquivo e então lança o cálculo.
- O pós-processador GLView Inova permite a exploração dos resultados.

O esquema da página seguinte descreve o funcionamento do modelamento numérico no Forge®_2005.

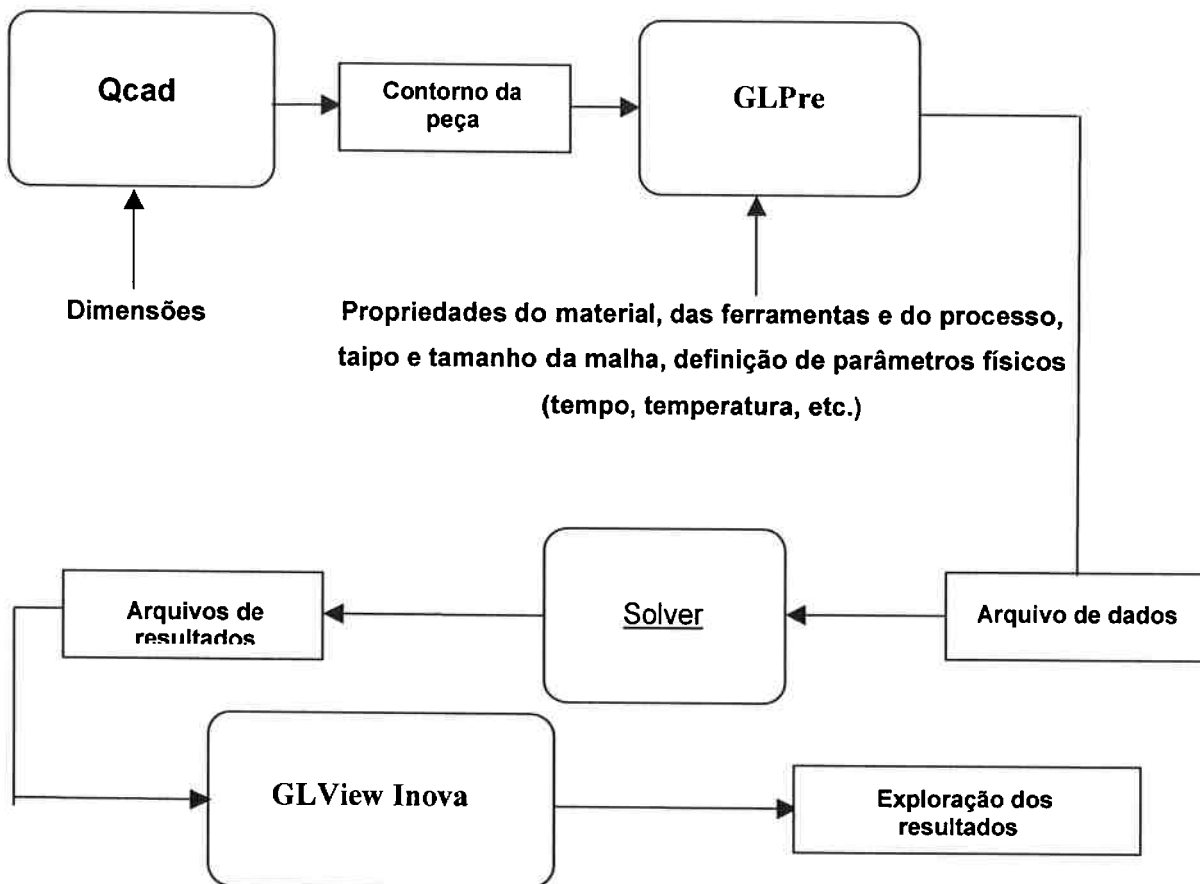


Figura 20: Esquema de funcionamento do programa Forge®_2005.

b) Modelamento

O modelamento foi realizado a partir de um modelo de resfriamento em 2 dimensões pré-definido no programa Forge®_2005, módulo 2D(GLPre).

c) Contorno da peça

Os contornos das placas foram desenhados com a ajuda do Qcad (Figura 21). As dimensões (meia-largura e espessura) foram modificadas para cada placa estudada, portanto diferentes modelos CAD foram criados.

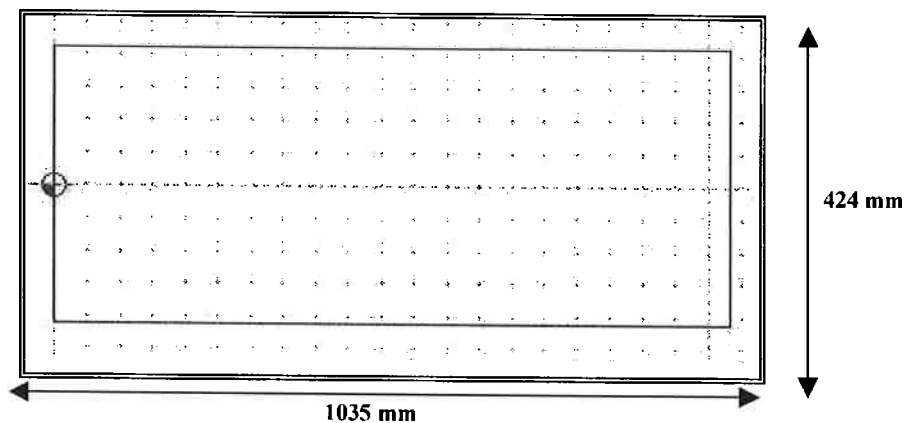


Figura 21: Exemplo de contorno criado a partir do Qcad.

d) Malha

Definir a malha de uma peça consiste em dividi-la em elementos finitos. O tipo de malha utilizado foi uma malha a três nós, isto é, composto de triângulos (Figura 22). Quatro modos de definir a malha de uma peça são pré-programados no Forge®_2005: malha fina, malha média, malha grosseira e malha manual (determinação de um tamanho de malha). Neste modelamento, o modo manual foi escolhido para definir os elementos da placa. Uma malha mais grossa foi utilizada para o centro da placa enquanto que, para as zonas próximas da superfície, uma malha mais fina foi atribuída. O tamanho da malha é determinado pelo raio médio da circunferência na qual o triângulo (elemento finito) pode ser inscrito. Neste trabalho foram utilizados tamanhos de malha no centro da placa variando entre 0,009 m (placas de 200 mm de espessura) a 0,014 m (placas de 750 mm de espessura). Na região próxima à superfície da placa, o tamanho da malha foi variado entre 0,0045 m e 0,007 m, para placas de 200 e 750 mm de espessura, respectivamente.

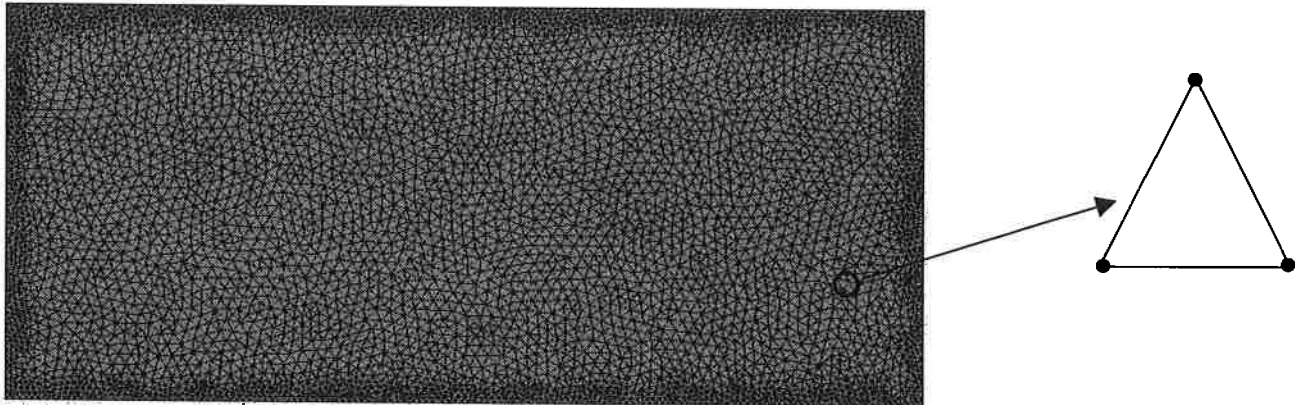


Figura 22: Malha a três nós de uma placa.

e) Propriedades do material

Um arquivo de dados do material (extensão tmf), contendo as propriedades térmicas e os coeficientes de difusão e de solubilidade do aço escolhido para simulação, é utilizado pelo GLPre para determinar as propriedades do material que será simulado.

f) Parâmetros de cálculo

O tempo de resfriamento ao ar total aplicado a cada modelamento corresponde ao tempo entre a saída do forno de aquecimento, antes do pré-forjamento, até o final do resfriamento ao ar, isto é, a duração das operações de conformação a quente somada ao tempo total de resfriamento ao ar da placa. Como o modelamento da conformação a quente dos lingotes é longa e difícil, uma primeira aproximação foi feita: esta etapa será modelada como um modelo de resfriamento ao ar. O armazenamento dos perfis de temperatura é feito a cada 30 minutos para os primeiros 150 minutos e em seguida a cada 60 minutos. Podem ser adicionados intervalos adicionais de armazenamento de dados, segundo as necessidades da simulação.

g) Condições de simetria

Mesmo que cada placa possua dois eixos de simetria (um na meia-largura e outro na meia-espessura), só o primeiro eixo foi determinado, com a finalidade de poder definir condições limites diferentes nas faces superior e inferior da placa, caso isto seja necessário (Figura 23).

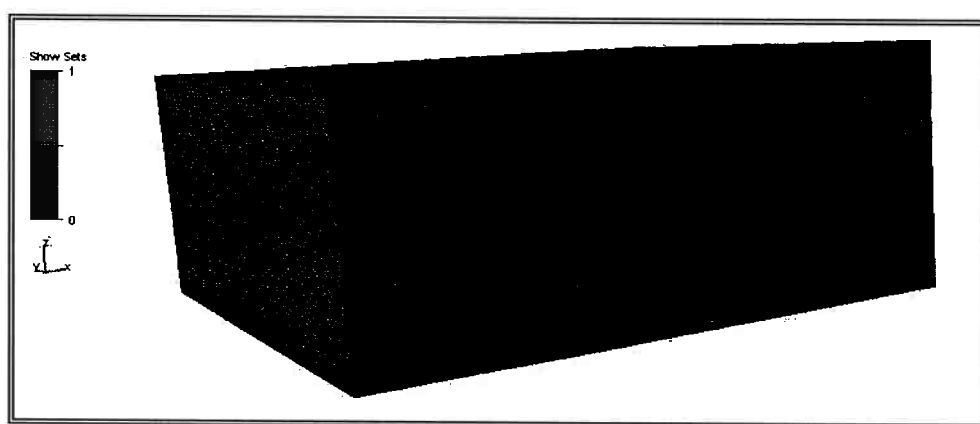


Figura 23: Definição do eixo de simetria à meia-largura.

h) Definição dos sensores

Os sensores são utilizados para posicionar pontos na peça a fim de registrar informações escalares (deformação, temperatura). Logo, usando um sensor, é possível traçar facilmente as evoluções da temperatura em função do tempo de resfriamento para um ponto da placa estudada.

Cinco sensores foram utilizados para cada placa (Figura 24):

- O sensor 1, localizado na superfície e no eixo de simetria (meia-largura);
- O sensor 2, situado na superfície e a 60 cm da extremidade lateral direita;
- O sensor 3, situado na superfície e a 30 cm da extremidade lateral direita.

- O sensor 4, localizado no meio da placa.
- O sensor 5, localizado à meia-espessura e à 30 cm da extremidade.

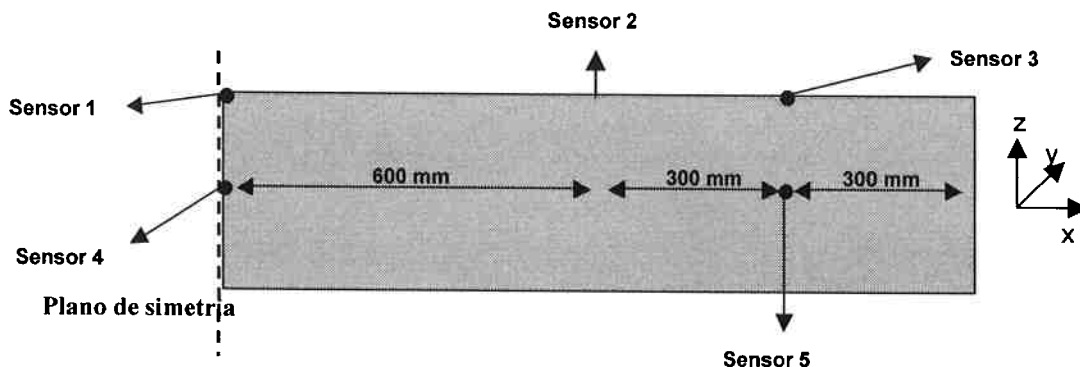


Figura 24: Localização dos sensores de temperatura no programa Forge_2005®.

i) Arquivo de dados

O arquivo de dados é aquele gerado pelo GLPre. Ele é salvo com a extensão “.don” e contém todas as informações do modelamento estabelecidas pelo usuário no GLPre. Este arquivo é em seguida carregado pelo “solver”, que efetua o cálculo, levando em conta os dados presentes no arquivo. Um exemplo de arquivo de dados é mostrado no Anexo 5.

4.2.3. Obtenção dos parâmetros de simulação

O coeficiente de troca de calor (h) entre as placas e o Fraasil e as propriedades termofísicas do Fraasil não estão disponíveis nos bancos de dados do centro de pesquisas e do programa de simulação. A sua obtenção será descrita a seguir.

a) Coeficiente de troca de calor (h)

Para assegurar-se que a simulação reproduzirá ao máximo a transferência de calor nos processos de conformação a quente e de resfriamento na Industeel Loire, é preciso que as curvas de resfriamento calculadas sejam as mais próximas possíveis das temperaturas medidas com o pirômetro óptico. Para isto, 3 placas foram usadas

como placas de referência: as placas de 424, 596 e 761 mm de espessura (Tabela 4). Variando-se o coeficiente de troca de calor (h) entre a placa e o ar, várias simulações foram feitas e as curvas de temperaturas medidas e calculadas, comparadas entre si. O coeficiente adotado em todas as outras simulações será aquele que tornar as curvas calculadas e medidas mais próximas.

O resfriamento ao ar foi simulado após a operação de conformação a quente, isto é, seu perfil inicial de temperatura é o mesmo obtido no final da simulação de conformação a quente. Os sensores utilizados foram os sensores 1 e 3.

Os coeficientes de transferência de calor obtidos estão apresentados no item 5.2.1.

b) Propriedades térmicas do Fraasil

As propriedades físicas e térmicas do Fraasil não são conhecidas pela empresa. Foi necessário, então, desenvolver um método de estimá-las. A solução encontrada foi realizar um ensaio de temperatura em uma placa submetida a um resfriamento no Fraasil, estudando a evolução da temperatura dentro da placa.

A placa escolhida é do tipo C-Mn (baixa liga) e mede 2000 mm de largura por 500 mm de espessura. Dois termopares foram colocados (Figura 25): o termopar 1 no meio da placa e o termopar 2 situado a 80 mm da superfície superior e a meia largura da placa).

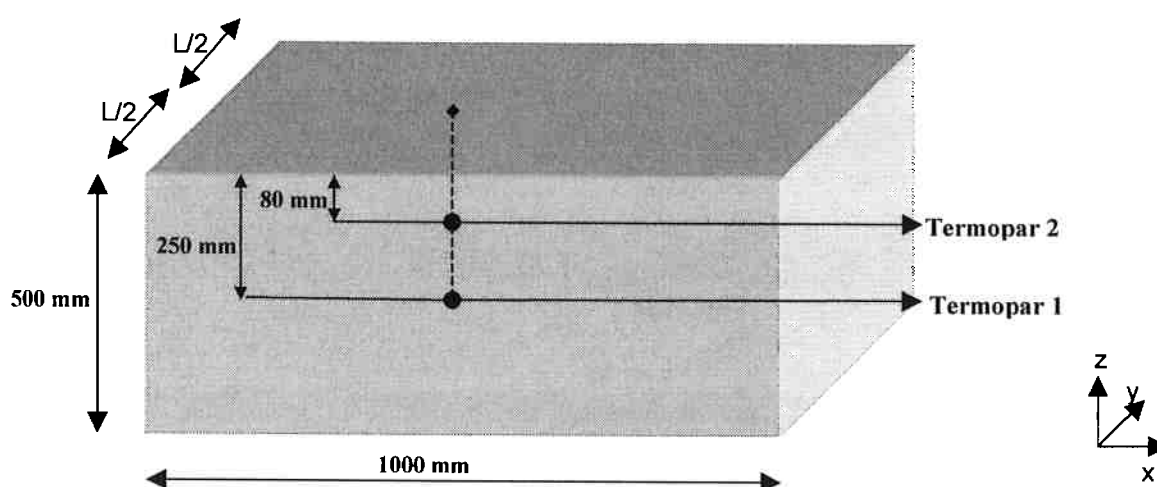


Figura 25: Posição dos termopares na placa.

A placa saiu do forno com 890 °C (temperatura homogênea) e foi submetida a um resfriamento ao ar de duas horas. Em seguida, ela foi enterrada no Fraisil (esta operação durou 15 minutos), onde ficou por 150 horas. Os resultados deste ensaio são apresentados na Figura 34 e no Anexo 8.

A estimativa das propriedades térmicas do Fraisil é feita por solução inversa, simulando o ensaio de temperatura. A placa é envolvida no Fraisil (Figura 26): 15 cm acima da placa, 50 cm nas laterais, e um metro abaixo da placa (o que permite de simular o solo de concreto sob o Fraisil).

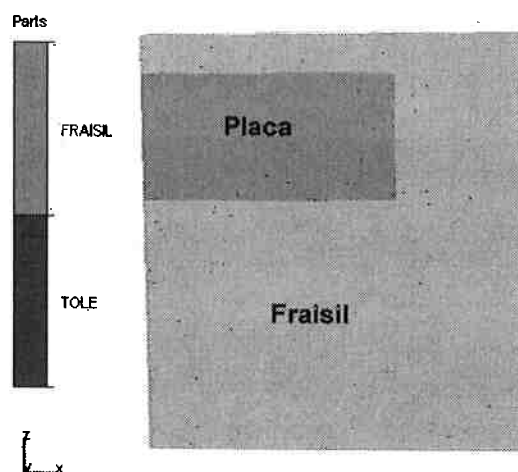


Figura 26: Modelo placa + Fraisil utilizado nas simulações.

O fluxo de calor é realizado pela convecção entre Fraisil e o ar, pela radiação da placa, e pela condução entre o Fraisil e a placa. As propriedades físicas e térmicas do Fraisil são, na realidade, propriedades aparentes, pois trata-se de um meio poroso, constituído de uma mistura de rochas vulcânicas e ar. Este fluxo de calor depende do coeficiente de troca de calor entre a placa e o Fraisil (h_{PF}), da densidade (ρ_F), do calor específico (C_{pF}) e da condutividade térmica do Fraisil (k_F). Foram estabelecidos valores iniciais para estas propriedades ^[7], sabendo que o Fraisil é constituído de rochas do tipo pedra pomes (pumice). Uma medida de densidade aparente foi realizada no CRMC. Numerosas simulações foram feitas variando os 3 parâmetros restantes, e aquelas que geraram as curvas de

resfriamento mais próximas das curvas experimentais foram escolhidas. As propriedades obtidas através deste procedimento estão apresentadas no item 5.2.2.

4.2.4. Condições de simulação e propriedades utilizadas

As Tabelas 6 a 8 resumem as condições utilizadas na simulação de transferência de calor e de difusão de hidrogênio nas etapas de conformação a quente, resfriamento ao ar e resfriamento ao Fraasil, assim como as propriedades do Fraasil. Os aços utilizados na simulação e as espessuras das placas simuladas estão na Tabela 5. As propriedades termofísicas dos aços estão no Anexo 3.

Tabela 6 : Condições térmicas de simulação (placa).

Conformação a quente			Resfriamento ao ar		Resfriamento no Fraasil		
Temperatura inicial (°C)	Duração (min)	$h_{p,a}$ (W/m ² .K)	Duração	$h_{p,a}$ (W/m ² .K)	Temperatura inicial do Fraasil (°C)	Duração	$h_{p,f}$ (W/m ² .K)
1300	30	10	Segundo normas de resfriamento (Anexo 2)	15	20	Segundo normas de resfriamento (Anexo 2)	0,7
$h_{p,a}$ = coeficiente de transporte de calor entre a placa e o ar. $h_{p,f}$ = coeficiente de transporte de calor entre a placa e o Fraasil.							

Os coeficientes de troca de calor e as propriedades do Fraasil foram obtidos por solução inversa, como descrito no item anterior. Os resultados podem ser verificados no item 5.2.

Tabela 7: Condições de transferência de massa.

Pressão parcial de H ₂ (bar)	Concentração inicial de hidrogênio na placa (ppm)
0	1.2

Tabela 8: Condições de simulação do resfriamento no Fraasil.

Densidade (ρ) (kg/m ³)	Condutividade térmica (λ) (W/m.K)	Calor específico (C_p) (J/kg.K)	$h_{f,a}$ (W/m ² .K)
970	2.35	1000	10
$H_{f,a}$ = coeficiente de transporte de calor entre o Fraasil e o ar.			

As propriedades termofísicas dos materiais dependem da sua microestrutura. As transformações de fase foram levadas em conta no cálculo dessas propriedades (feito no Centro de Pesquisas de Materiais – CRMC), e o seu valor depende da quantidade de cada fase contida na microestrutura da placa.

5. Resultados

5.1. Medidas de temperatura

5.1.1. Resfriamento ao ar

As medidas foram feitas segundo o procedimento descrito no item 4.1.4 em 5 placas de espessuras variáveis: 424, 480, 490, 596 e 761 mm. A Figura 27 apresenta os resultados das medidas de resfriamento ao ar feitas com o pirômetro óptico. Como as medidas de temperatura não foram feitas continuamente, e como o pirômetro tem precisão de algumas dezenas de graus Celsius, as curvas de temperatura são imprecisas. Nota-se que a placa de 480 mm possui uma velocidade de resfriamento maior que a de uma placa de 424 mm de espessura, o que teoricamente não seria possível (a placa mais fina resfria mais rápido). Estas curvas foram utilizadas para determinar os coeficientes de transporte de calor (item 5.2.1).

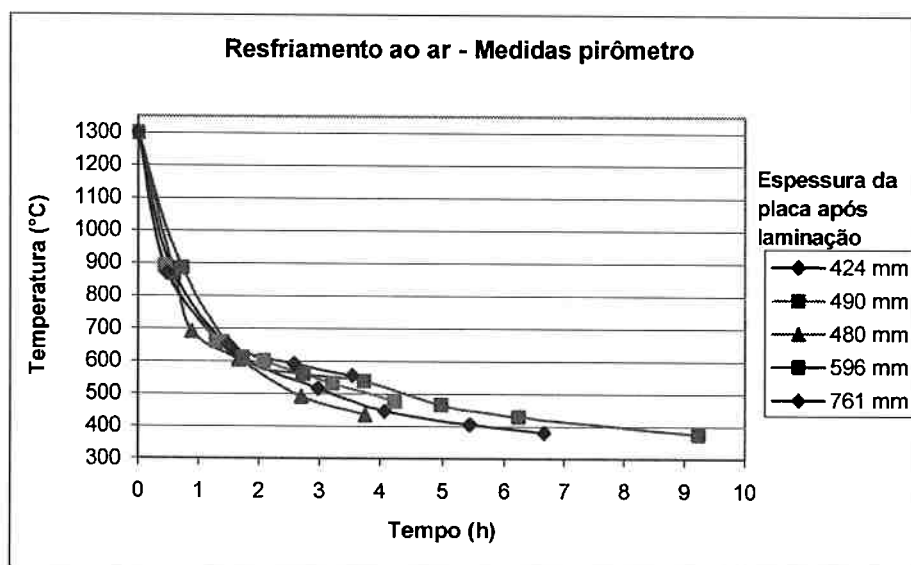


Figura 27: Curvas de resfriamento na superfície das placas durante resfriamento ao ar medidas por pirômetro óptico.

5.1.2. Fraisil

Duas placas foram escolhidas, uma de espessura 424 mm e outra de 757 mm. O resfriamento das placas no Fraisil se faz muito mais lentamente que o resfriamento ao ar. Realmente, o Fraisil é um isolante térmico que impede a troca de calor entre a placa e o meio-ambiente. O transporte de calor se faz principalmente entre a placa e o ar dentro do Fraisil (meio poroso), sendo a temperatura no ar próxima àquela da superfície da placa. Existe também a condução de calor entre a placa e o Fraisil, que encontra-se inicialmente à temperatura ambiente. As curvas de temperatura na superfície da placa apresentam primeiramente um perfil de crescimento, devido à homogeneização da temperatura da placa (a difusão de calor na placa é mais importante que a sua troca de energia com o ar). Em seguida, como a temperatura da placa é quase homogênea, a transferência de calor será predominante no sentido da placa para o ambiente (Figura 28). Pode-se observar que a velocidade de resfriamento da placa no Fraisil é relativamente baixa, chegando a 1 °C/h, para uma placa de 757 mm de espessura.

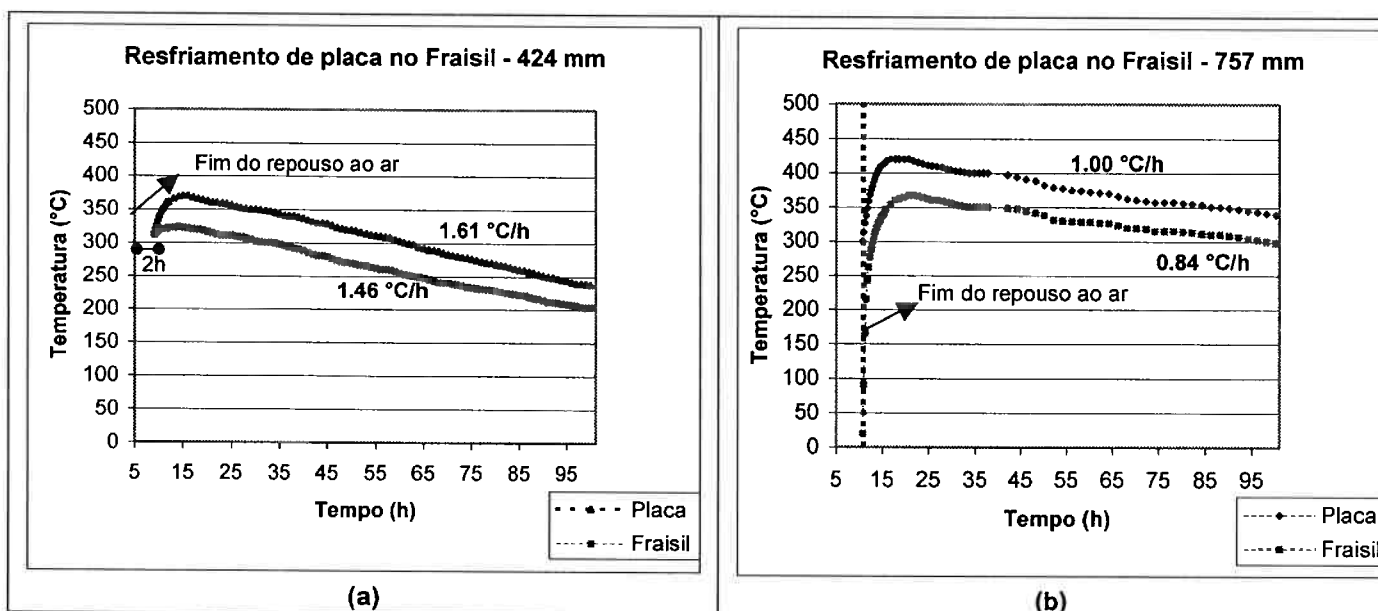


Figura 28: Perfil da temperatura na superfície de duas placas diferentes e no Fraisil durante resfriamento controlado.

A transferência de calor apresenta uma dependência em relação à espessura da placa. Por exemplo, as velocidades de resfriamento das placas de espessura 424 mm e 757 mm são, respectivamente, de 1,61 e 1,00 °C/h e a velocidade de resfriamento do Fraisil situado a ~5cm é de, respectivamente, 1,46 e 0,84 °C/h.

A Figura 29 mostra o perfil experimental de resfriamento da placa de espessura 424 mm. Este perfil reúne as etapas de resfriamento ao ar e no Fraisil. A diferença de 2 horas entre o final do resfriamento ao ar e o início das medidas no Fraisil é causada por problemas de funcionamento dos termopares. Apesar deste problema, pode-se notar uma diferença de temperatura da superfície da placa de cerca de 100 °C entre as 2 etapas. Esta se produz por causa da falta de precisão do pirômetro óptico e do fato que as duas etapas de medidas de temperatura não foram feitas para um mesmo ponto da placa.

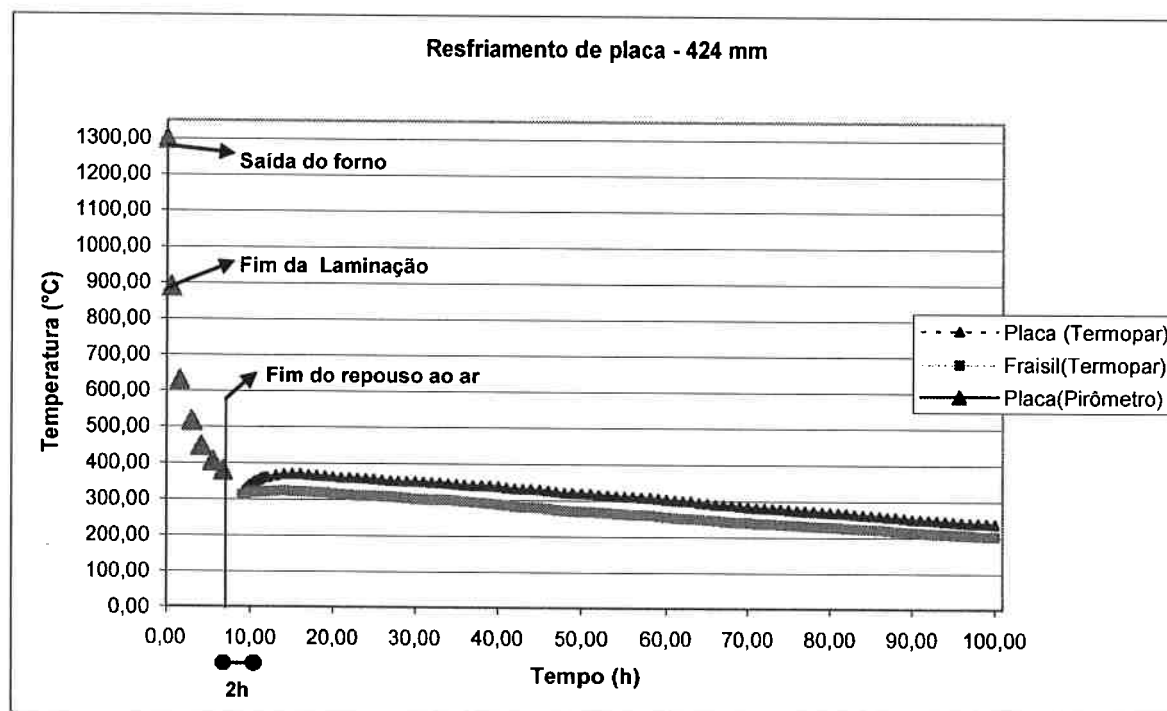


Figura 29: Curvas experimentais de resfriamento para uma placa de espessura 424 mm.

5.2. Resultado das simulações

5.2.1. Obtenção dos coeficientes de troca de calor durante as etapas de conformação a quente e resfriamento ao ar.

As medidas experimentais de resfriamento ao ar, apresentadas no item 5.1.1, foram simuladas no software Forge_2005® e os seus resultados analisados.

Um exemplo de perfil de temperatura de uma placa durante o resfriamento ao ar é apresentado abaixo:

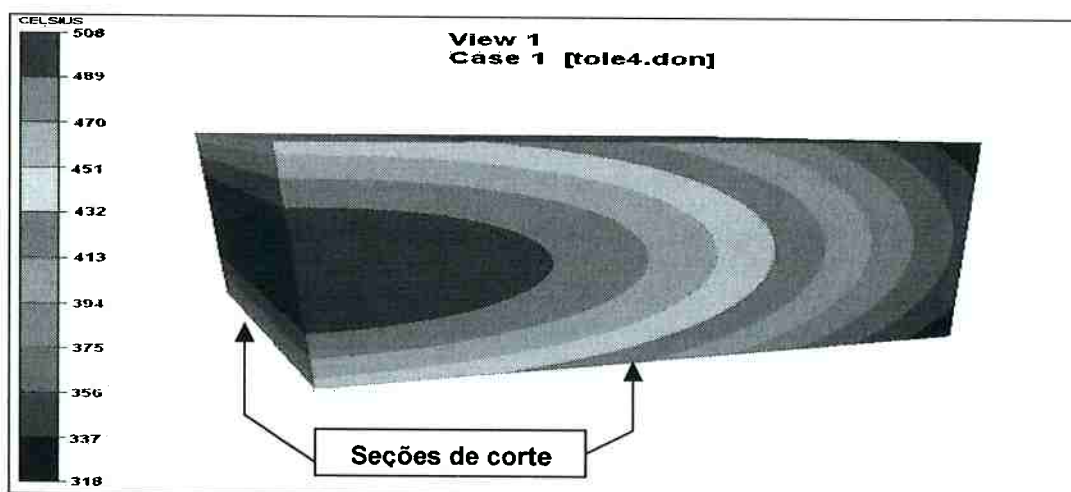


Figura 30: Perfil de temperatura para uma placa 2068mm X 596mm após 9h14 de resfriamento ao ar.

A temperatura apresenta seu valor máximo no centro da placa e mínimo nos cantos (Figura 30). O fluxo de calor é maior nos cantos devido à convecção e a radiação influenciadas pela grande diferença de temperatura entre a superfície da placa e ao ar. O centro da placa sofre apenas o fenômeno de condução de calor para a superfície. Nota-se também que a temperatura nos cantos é menor do que aquela no meio da superfície superior da placa, pois o canto possui uma maior superfície de troca térmica com ar.

A Figura 31 mostra as curvas de resfriamento ao ar para um ponto situado no meio da superfície superior (sensor 1). Estas curvas foram construídas para placas de seis espessuras diferentes, compreendidas entre 424 e 761 mm. No início do resfriamento, a condução de energia no interior da placa é quase nula e a variação

de temperatura com o tempo é praticamente a mesma para todas as placas, pois um tempo mínimo é necessário para que haja transferência de calor por condução em distâncias relativamente grandes. Após cerca de uma hora de resfriamento, observa-se uma diferença de comportamento entre as curvas de resfriamento para as diferentes placas, pois nesse caso, a condução de calor passa a ser importante. As placas mais espessas terão, portanto, uma distância de difusão (condução) mais importante, e o transporte de calor será feito mais lentamente, em comparação com as placas mais finas. Após sete horas de resfriamento ao ar, uma diferença de cerca de 150 °C se produzirá entre as temperaturas registradas pelo sensor 1 nas placas de 757 e 424 mm.

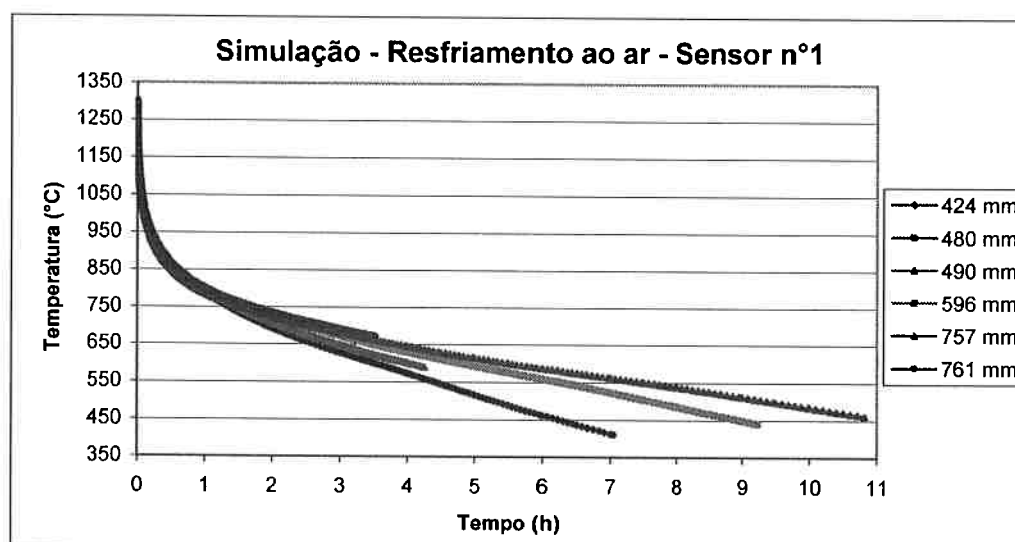


Figura 31: Curvas de resfriamento para placas de diferentes espessuras.

Para verificar se o coeficiente de transporte de calor utilizado inicialmente nas simulações é adequado, as curvas de resfriamento obtidas a partir das simulações de resfriamento ao ar foram superpostas aos pontos experimentais. Um exemplo de simulação realizada com o coeficiente de transferência de calor utilizado, até então, nas simulações do centro de pesquisas ($h=12 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) está apresentado na Figura 32. Esta Figura apresenta uma comparação dos dados oriundos dessas simulações e as medidas experimentais para uma placa de espessura após laminação de 480 mm. Mesmo se os comportamentos das curvas teóricas e experimentais são próximos, pode-se notar uma diferença de cerca de 150 °C entre a temperatura

prevista pela simulação e a temperatura medida durante o resfriamento ao ar. A mesma comparação foi feita para as outras placas e os resultados são mostrados no Anexo 7.

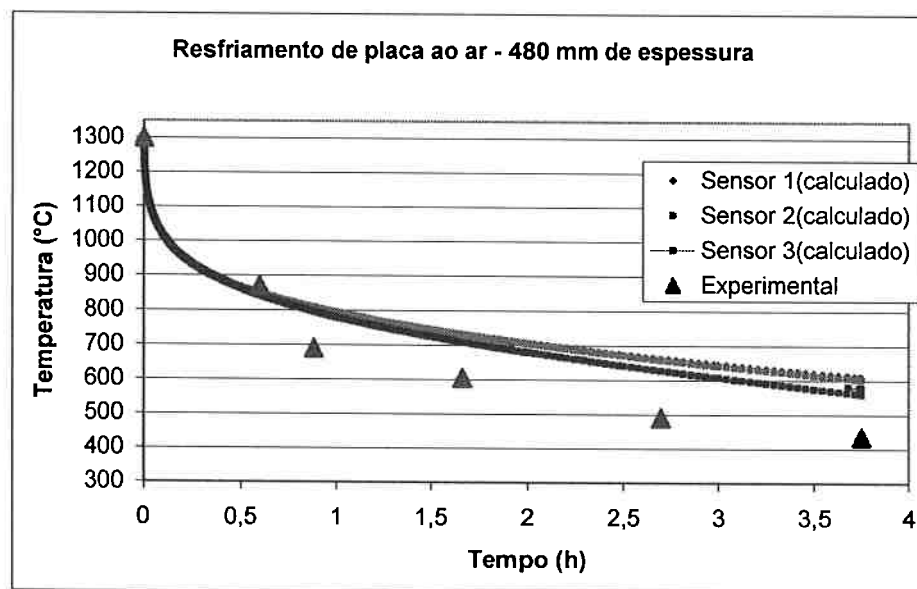


Figura 32: Comparação entre os dados experimentais (pirômetro óptico) e os resultados de simulação (sensores 1, 2 e 3) de uma placa de 480 mm de espessura – $h=12\text{W/m}^2\cdot\text{K}$.

Após diversos testes com coeficientes h variados, obteve-se um valor ótimo para cada etapa (conformação a quente e resfriamento ao ar), que resultam nas curvas calculadas mais próximas das experimentais. As curvas de resfriamento obtidas com estes valores ótimos de h estão mostradas na Figura 33.

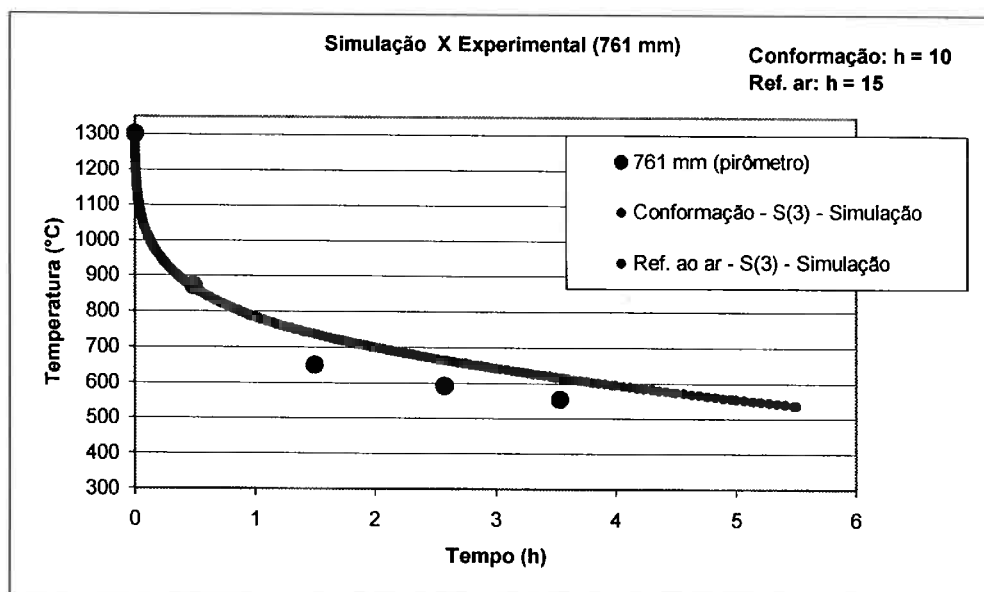


Figura 33: Exemplo de superposição dos resultados de simulação com os dados experimentais.

Os coeficientes escolhidos para as operações de conformação a quente e resfriamento ao ar são respectivamente, $h_1 = 10 \text{ W/m}^2.\text{k}$ e $h_2 = 15 \text{ W/m}^2.\text{k}$. Esta diferença entre os coeficientes é causada pela potência gerada pela deformação plástica durante a conformação a quente, que é transformada em calor dissipado e que vai aquecer o lingote. Este aquecimento compensará em parte o transporte de energia ao qual o lingote é submetido (radiação, convecção com o ar e condução com a ferramenta).

5.2.2. Propriedades térmicas do Fraasil

Seja a curva de resfriamento obtida experimentalmente a partir do ensaio de resfriamento realizado na usina de Châteauneuf apresentada na Figura 34. A curva experimental de resfriamento do termopar 2 (localização dos termopares descrita na Figura 25) apresenta um aumento na temperatura, no início do resfriamento no Fraasil. Este aumento se deve ao pequeno coeficiente de troca de calor entre a placa e o Fraasil. O fluxo de energia será então maior dentro da placa e o perfil de temperatura da placa terá a tendência de se tornar homogêneo.

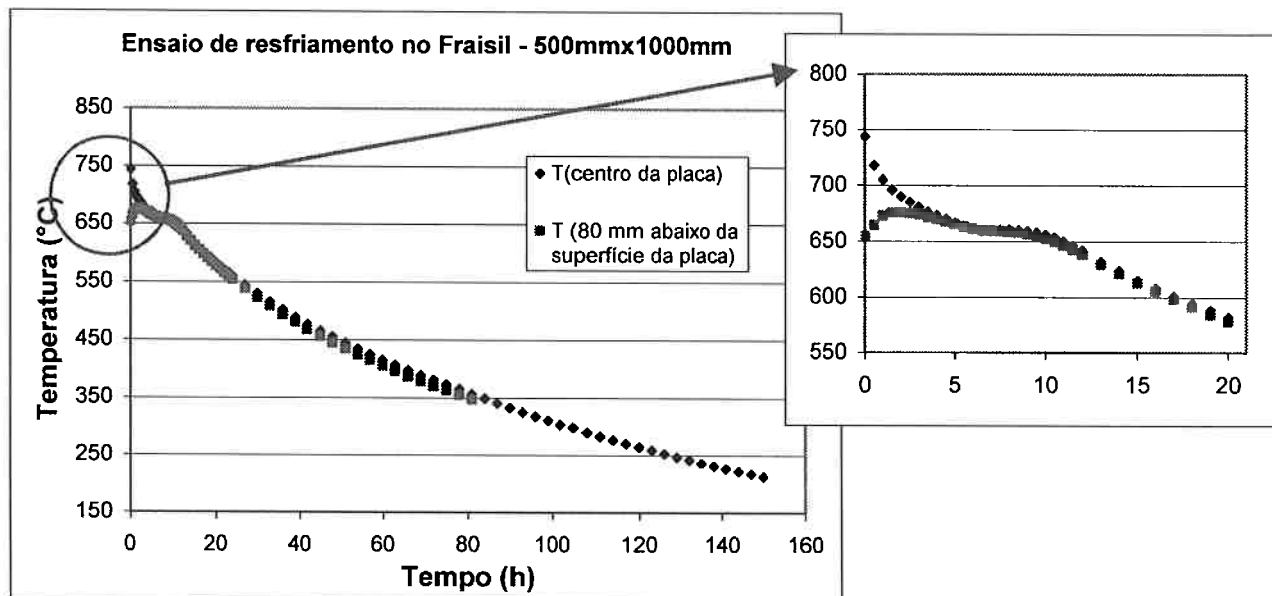


Figura 34: Curva experimental de resfriamento de uma placa de 500 mm no Fraasil.

O segundo aumento de temperatura, presente nas curvas dos dois termopares, evidencia uma transformação de fase. Trata-se de uma transformação do tipo austenita $\rightarrow$ ferrita + perlita, que é feita a uma baixa temperatura no ensaio (entre 630 °C e 660 °C), pois a placa usada é constituída de grãos grandes, deslocando as curvas de transformação de fase para a direita, e baixando o ponto desta transformação [8]. O diagrama TTT de um aço C-Mn baixa-liga (A 516 grade 70) encontra-se no Anexo 9.

Simulações do resfriamento no Fraasil foram realizadas variando-se os três parâmetros independentes (condutividade térmica, calor específico e coeficiente de troca de calor entre a placa e o Fraasil), e as curvas calculadas mais próximas das curvas experimentais foram escolhidas. A combinação ideal de parâmetros (propriedades do Fraasil) que gerou estas curvas é apresentada abaixo:

- Massa específica (ρ_F) : 970 kg.m⁻³
- Condutividade térmica (k_F) : 2.35 W.m⁻¹.K⁻¹
- Calor específico (C_{pF}) : 1000 J.kg⁻¹.K⁻¹
- Coeficiente de troca de calor entre a placa e o Fraasil (h_{pF}) : 0.7 W/m².K

O gráfico que mostra a comparação dos resultados de simulação e do ensaio encontra-se no Anexo 10.

Um estudo de variação foi feito para cada propriedade térmica. Variando-se esta propriedade, e mantendo as outras constantes, verificou-se a diferença da curva de resfriamento calculada em relação à curva medida, apresentada na Figura 34. Os resultados são apresentados no Anexo 14. Através dessas análises, é possível afirmar:

- A condutividade térmica e a densidade do Fraasil não possuem uma grande influência sobre o resfriamento da placa.
- O calor específico do Fraasil faz variar o comportamento das curvas de resfriamento das placas, e seu valor ideal é de $1000 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.
- O coeficiente de troca de calor entre o Fraasil e a placa é o principal fator que influencia o comportamento das curvas de resfriamento de placas no Fraasil. Essas curvas são desviadas desde o início do resfriamento. Este coeficiente não deve passar os seguintes limites: 0.7 e $0.9 \text{ W/m}^2.\text{K}$.

5.3. Otimização do resfriamento de placas espessas após laminação

A otimização do resfriamento de placas espessas após conformação a quente será realizada através da diminuição do tempo de resfriamento ao ar das placas, e analisando a consequência desta diminuição em relação ao resfriamento no Fraasil. A diminuição desta etapa de resfriamento permitirá a obtenção de melhores condições cinéticas para a difusão de hidrogênio na placa, pois esta será enterrada logo após a transformação $\gamma \rightarrow \alpha$, o que não acontece segundo as normas de resfriamento atuais da usina.

A otimização do resfriamento no Fraasil foi feita visando alcançar o mesmo perfil de concentração de hidrogênio na placa que é obtido com as normais atuais de resfriamento. Por exemplo, uma placa que é atualmente resfriada durante 5 dias no Fraasil poderá ser retirada alguns dias antes do Fraasil, logo que atingir o perfil de concentração de hidrogênio obtido com o processo atual de resfriamento de placas.

5.3.1. Otimização do resfriamento ao ar

A partir das simulações do resfriamento ao ar realizadas, um tempo máximo de repouso ao ar foi determinado para placas SP300® com espessuras variando entre 200 mm e 750 mm. Este tempo foi calculado através da determinação de um perfil de temperatura desejável no momento da entrada da placa no Fraissil, determinado a partir dos pontos de transformação de fase do material. Por exemplo, para um aço SP300®, a uma temperatura de 753 °C, a estrutura é 100% α ; a 817 °C, a estrutura é 100% γ ; entre essas suas temperaturas, a microestrutura é composta de uma mistura as fases $\alpha + \gamma$.

Os sensores 4 e 5 (Figura 24) foram utilizados para definir este perfil desejável de temperatura no aço SP300®, segundo os critérios abaixo:

- Para placas mais finas ($e < 600$ mm), os dois sensores devem estar dentro do intervalo de transformação metalúrgica, isto é, entre 753 °C et 817 °C.
- Para placas espessas ($e \geq 600$ mm), o sensor 4 deve estar acima de 817 °C e o sensor 5 deve estar abaixo de 753 °C.

A Figura 35 ilustra o procedimento de cálculo do tempo ideal de resfriamento ao ar para duas placas de espessuras diferentes.

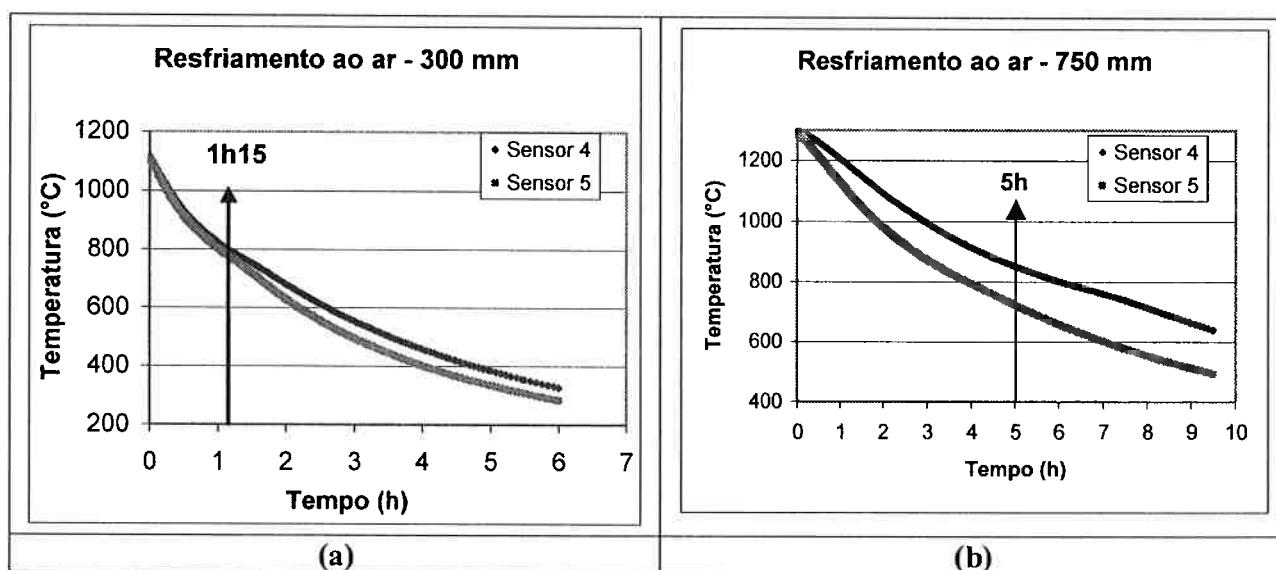


Figura 35: Tempo máximo de repouso ao ar para placas de espessura 400 mm (a) e 750 mm (b).

Este procedimento foi aplicado para as outras placas simuladas e o resultado é mostrado na Figura 36. Uma comparação foi feita entre o tempo de resfriamento ao ar calculado e as normas de resfriamento utilizadas atualmente na usina de Châteauneuf (Tabela 1). Nota-se que, para as placas com espessura menor ou igual a 350 mm, o tempo atual de resfriamento ao ar é ilimitado e as placas não são colocadas no Fraisil. Para as placas com espessura maior que 350 mm, o repouso ao ar é muito longo e a placa é colocada no Fraisil muito fria. O mesmo procedimento foi feito para os outros tipos de aços simulados, e os resultados são mostrados no Anexo 15.

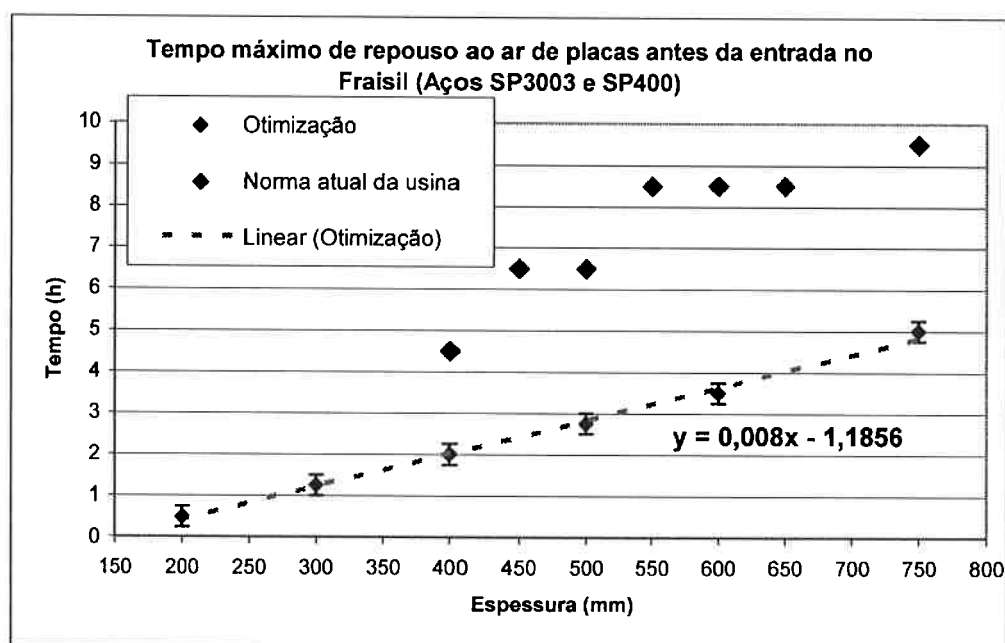


Figura 36: Resultados da otimização do resfriamento ao ar de placas espessas.

Foi encontrada uma relação entre a espessura da placa após acabamento e o tempo de resfriamento ao ar ambiente. Ela é dada pela equação $y = 0,008x - 1,1856$ sendo x a espessura da placa e y a duração do tempo de resfriamento ao ar. Esta equação permitirá à usina a fácil determinação do ciclo de resfriamento ao ar de uma placa no momento do pedido do produto.

Analisando a Figura 36 e os gráficos de tempo máximo de resfriamento das placas ao ar, contidos no Anexo 12, observa-se que as placas de aços SP300® e SP400® são enterradas no Fraasil muito frias, enquanto que as placas de aços DIN W.1.2311 e W.1.2312 são enterradas muito quentes. As placas AISI P20 e DIN W.1.2738, com espessura superior a 350 mm, possuem um repouso ao ar próximo àquele determinado após a otimização. Enterrar uma placa no Fraasil com uma temperatura muito baixa ou muito alta é prejudicial para a difusão de hidrogênio na placa. No primeiro caso, o hidrogênio não possuirá a ativação térmica necessária para difundir-se na placa e o centro desta apresentará uma concentração alta em hidrogênio. Se a placa é muito quente, não haverá uma difusão significativa nos primeiros dias de Fraasil (a estrutura será ainda austenítica, e não ferrítica, como desejada), e em seguida, o hidrogênio irá difundir-se em direção ao centro da placa, pois esta continuará austenítica, enquanto as bordas se transformarão na estrutura de ferrita. O centro da placa terá, no final do tratamento, um pico acentuado de concentração de hidrogênio em relação às bordas.

5.3.2. Fraasil

A mesma duração do resfriamento no Fraasil utilizada nas normas atuais (Tabela 1) foi empregada em simulações deste resfriamento no programa Forge_2005®, e os resultados destas simulações foram comparados aos ciclos de resfriamento atual em Châteauneuf.

Para uma placa do aço SP300® de 400 mm de espessura, as simulações seguintes foram realizadas:

- Norma atual: 30 min de conformação + 4h30 de repouso ao ar + 5 dias de resfriamento no Fraasil.
- Otimização: 30 min de conformação + 2h de repouso ao ar + 5 dias de resfriamento no Fraasil.

Os perfis de temperatura (°C) e de concentração do hidrogênio (ppm) na placa são mostrados na Figura 37 e na Figura 38. Eles representam o momento em que a placa foi colocada no Fraasil, Como foi explicado no item anterior, a placa é colocada

muito fria no Fraisil, seguindo as normas atuais de resfriamento. Segundo a otimização que foi realizada, a placa deveria ser enterrada no Fraisil com uma temperatura no centro de aproximadamente 150 °C superior à temperatura atual (640 °C ao invés de 490 °C).

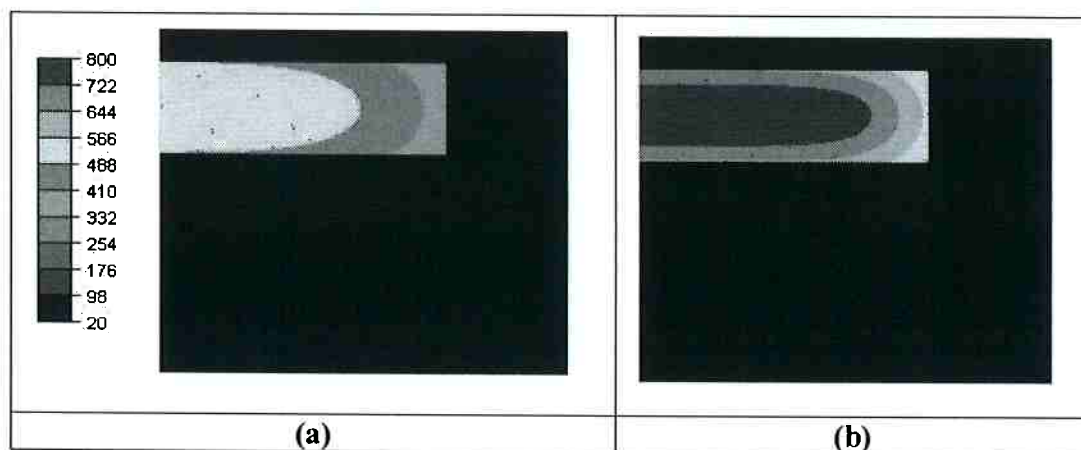


Figura 37: Perfil de temperatura na placa SP300® de 400 mm de espessura no momento em que ela é colocada no Fraisil. Norma atual (a) e com resfriamento ao ar otimizado (b).

A concentração inicial de hidrogênio na placa varia muito pouco entre os dois ciclos de resfriamento, o que evidencia a pequena difusão de hidrogênio durante o resfriamento ao ar da placa.

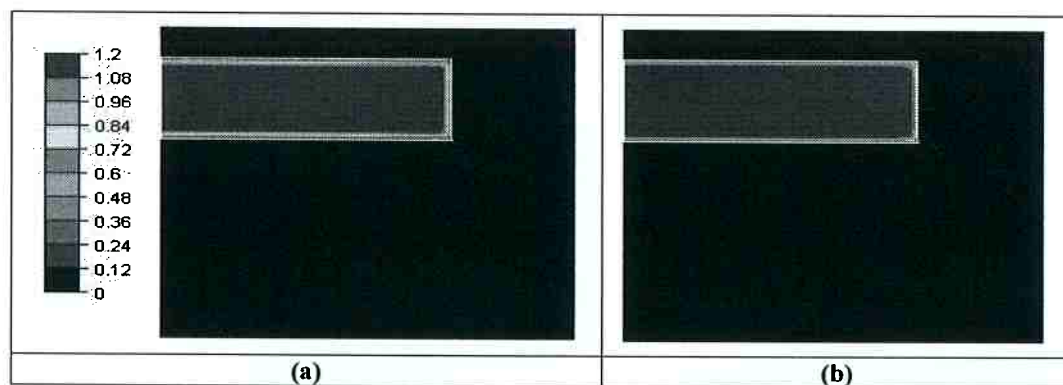


Figura 38: Perfil da concentração de hidrogênio na placa SP300® de 400 mm de espessura no momento em que ela é colocada no Fraisil. Norma atual (a) e com resfriamento ao ar otimizado (b).

A Figura 39 mostra o perfil de hidrogênio na placa após um resfriamento de 5 dias no Fraisil. A placa que foi submetida ao resfriamento otimizado é enterrada no Fraisil com uma temperatura mais alta que aquela da placa submetida ao ciclo de

resfriamento atual. A difusão de hidrogênio é, portanto, muito maior na primeira placa, pois o fenômeno de difusão depende exponencialmente da temperatura.

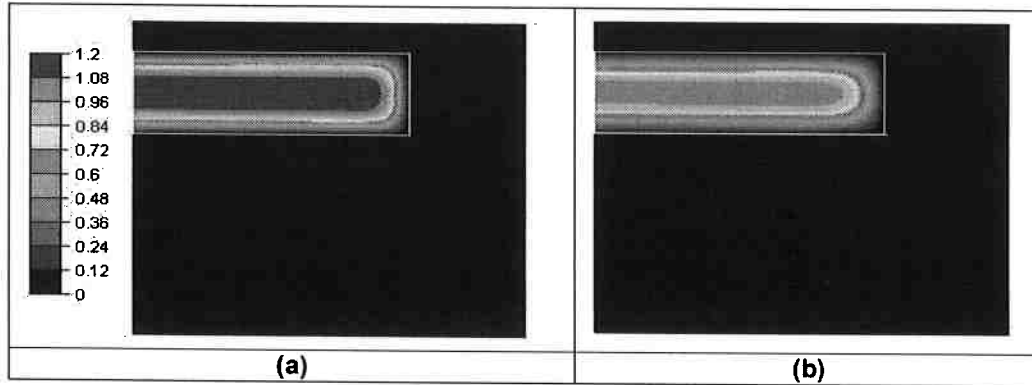


Figura 39: Perfil da concentração de hidrogênio na placa SP300® de 400 mm de espessura após 5 dias de resfriamento no Fraasil. Norma atual (a) e resfriamento ao ar otimizado (b).

Para poder ilustrar a difusão de hidrogênio na placa ao longo do seu resfriamento no Fraasil, valores de concentração de hidrogênio e de temperatura foram extraídos, a partir das simulações realizadas em uma placa de 400 mm de espessura. Esses dados foram obtidos ao longo do seu plano de simetria (ao longo da sua espessura, à meia-largura). A Figura 40 mostra a evolução da temperatura para os dois ciclos de resfriamento e a Figura 41 mostra o perfil de concentração de hidrogênio na placa.

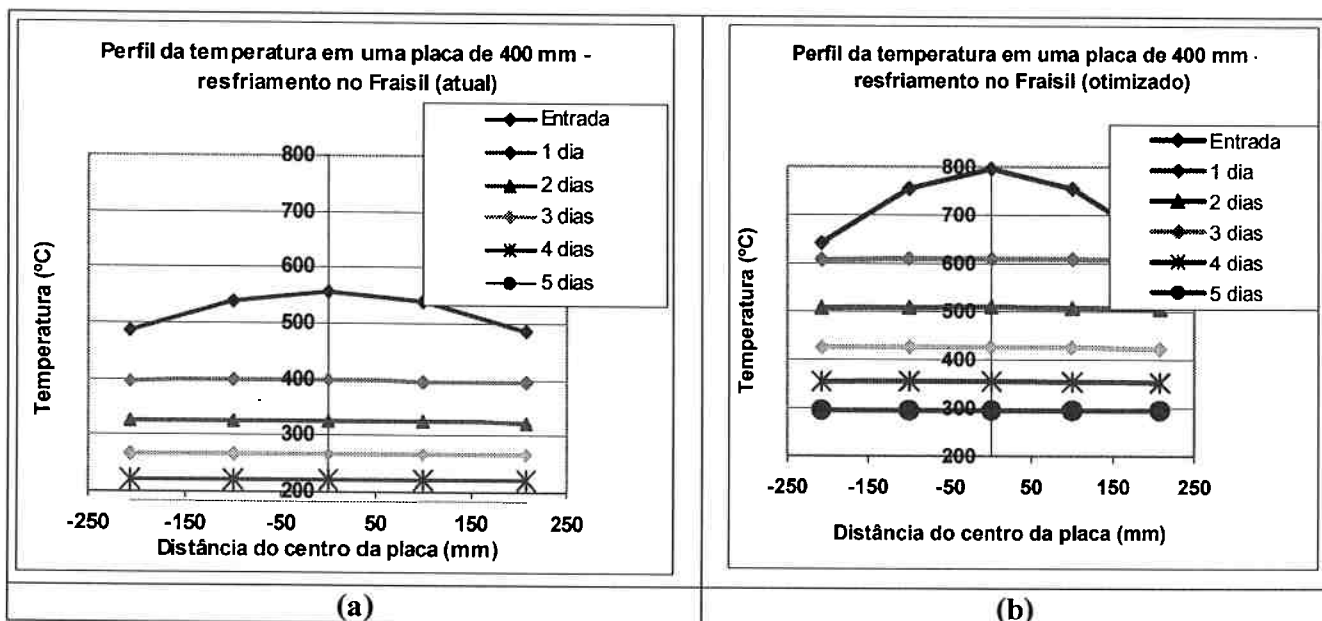


Figura 40: Evolução da temperatura em uma placa de 400 mm durante resfriamento no Fraasil. Ciclo atual (a) e resfriamento ao ar otimizado (b).

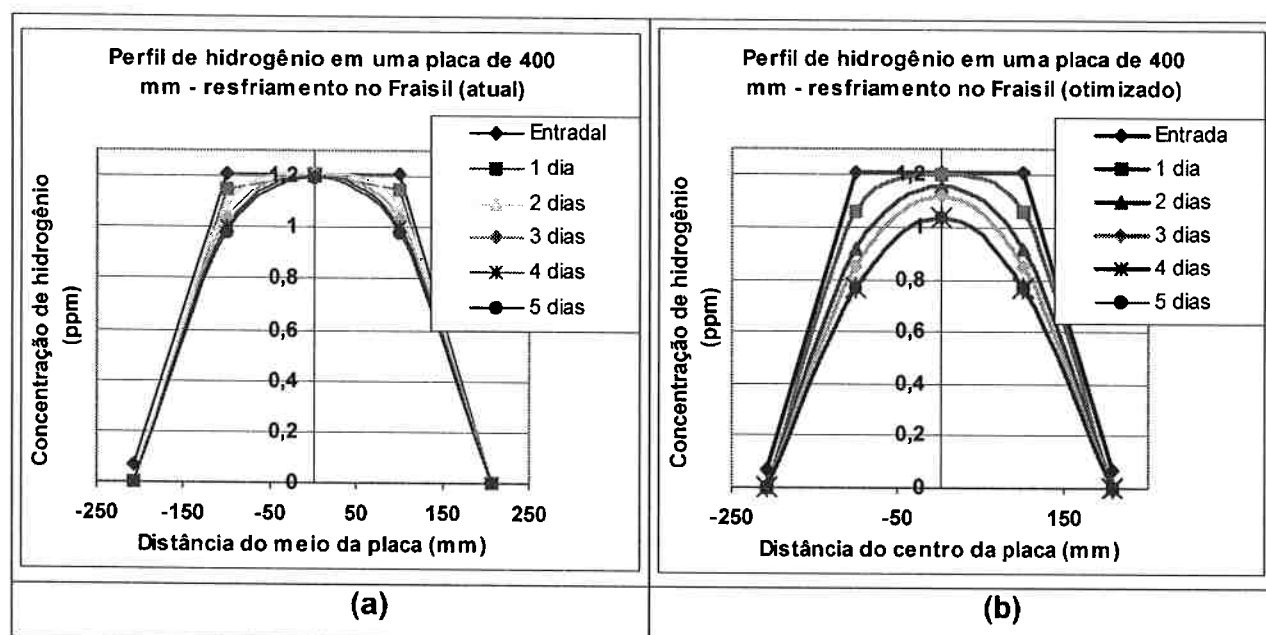


Figura 41: Evolução da concentração de hidrogênio em uma placa de 400 mm durante resfriamento no Frasil. Ciclo atual (a) e resfriamento ao ar otimizado (b).

Nota-se que o ciclo de resfriamento ao ar otimizado permite uma difusão de hidrogênio muito mais eficiente durante o Frasil que o ciclo atual. A temperatura média de entrada no Frasil neste caso é maior e, como a distância de difusão é relativamente grande (200 mm), é necessária uma ativação térmica suficiente para que o hidrogênio situado no centro da placa possa difundir na direção da superfície. Na placa que foi submetida ao resfriamento atual, a ativação térmica é insuficiente e o centro da placa apresenta uma concentração de hidrogênio constante (1.2 ppm) ao longo do seu resfriamento no Frasil.

A mesma comparação foi feita para placas de 200 mm, 500 mm, 600 mm e 750 mm de espessura. Os resultados são apresentados no Anexo 13. Os resultados reunidos provam que a otimização do resfriamento é muito importante para placas finas (ex: 200 mm) e pouco importantes para placas muito espessas (ex: 750 mm). Isto se deve à grande diferença entre as distâncias de difusão que serão percorridas pelo átomo de hidrogênio (375 mm versus 100 mm) e, mesmo se o centro da placa possuir uma temperatura alta (aproximadamente 800 °C), não há difusão suficiente para a redução da sua concentração de hidrogênio.

5.3.3. Redução do tempo de resfriamento

As Tabelas 9 e 10 a seguir são um resumo dos resultados da otimização dos resfriamentos ao ar e no Fraisil. Elas mostram o ganho de tempo possível no processo de resfriamento de placas que a usina poderá ter, se desenvolver e aplicar novas normas de resfriamento baseadas neste trabalho. A duração ideal do resfriamento no Fraisil foi determinada a partir do perfil de hidrogênio na placa no final do seu resfriamento. A concentração de hidrogênio na placa deve ser menor ou igual àquela obtida através do ciclo atual de resfriamento. Por exemplo, a Figura 41 mostra que, em menos de 2 dias no Fraisil, a placa otimizada (direita), apresentará o mesmo perfil de hidrogênio que a placa submetida ao ciclo atual (esquerda).

A economia de tempo é considerável, principalmente na duração do resfriamento no Fraisil. A economia é de 70% para placas de 400 a 600 mm e de 65% para placas de 750 mm.

Tabela 9: Ganho de tempo no resfriamento ao ar após otimização.

Resfriamento ao ar			
Espessura (mm)	Atual	Otimizado	Ganho de tempo
200	Ilimitado	25 min	-
250	Ilimitado	50 min	-
300	Ilimitado	1h15	-
350	Ilimitado	1h35	-
400	4h30	2h	2h30
450	6h30	2h25	4h05
500	6h30	2h50	3h40
550	8h30	3h15	5h15
600	8h30	3h35	4h55
650	8h30	4h	4h30
700	8h30	4h25	4h05
750	9h30	4h50	4h40

Tabela 10 : Ganho de tempo no resfriamento ao Fraisil após otimização.

Fraissil			
Espessura (mm)	Atual	Otimizado	Ganho de tempo
400	5 dias	1.5 dias	3.5 dias
500	6 dias	1.5 dias	3.5 dias
600	7 dias	1.5 dias	3.5 dias
750	10 dias	3.5 dias	6.5 dias

5.3.4. Ciclo de resfriamento otimizado

O ciclo ideal de resfriamento para uma placa SP300® de 400 mm de espessura é mostrado na Figura 42. O gráfico apresenta as curvas de resfriamento para as 3 etapas estudadas neste projeto: a conformação a quente (30 min), o resfriamento ao ar (2h) e o resfriamento no Fraislil. A duração do resfriamento no Fraislil escolhida foi de 5 dias, mais ela pode variar, segundo as necessidades do cliente e da empresa.

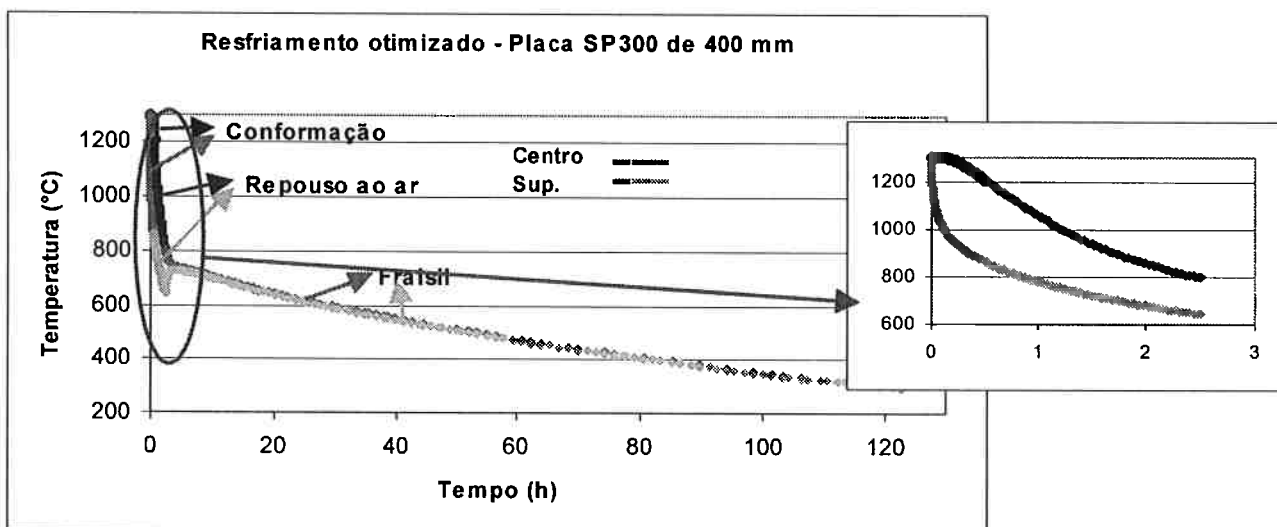


Figura 42: Ciclo de conformação e resfriamento otimizado para uma placa de 400mm de espessura. Os dois gráficos possuem os mesmos eixos.

6. Conclusões

Este trabalho mostrou que o resfriamento no Fraisil promove uma difusão eficiente de hidrogênio de uma placa de aço laminada em direção ao seu meio-ambiente, para placas pouco ou meio espessas (até 500 mm). A aplicação deste tipo de resfriamento para placas espessas (ex : 750 mm de espessura) só é desejável se for visto principalmente como uma operação de tratamento térmico, pois a difusão é muito pequena neste tipo de placas e o teor de hidrogênio é pouco afetado.

A otimização do resfriamento de placas espessas após laminação depende fortemente do tempo de repouso ao ar. O ciclo de resfriamento ao ar ideal para placas SP300® e SP400® seria determinado, então, pela Tabela 9. O engenheiro poderá escolher entre 3 possíveis soluções para o resfriamento no Fraisil:

1. Se o parâmetro mais importante é o prazo de entrega das placas, é necessário apenas reduzir a duração do tratamento no Fraisil (Tabela 10). O profissional fará economias de tempo de até 70%.
2. Se o objetivo é melhorar a qualidade dos produtos, é necessário efetuar a duração atual do Fraisil (3 a 5 dias). Este trabalho mostrou que para placas pouco e meio espessas, a desgazeificação ocorre ainda após alguns dias no Fraisil.
3. Se os dois parâmetros são importantes, a solução é determinar uma duração ideal do resfriamento no Fraisil, de acordo com as necessidades do cliente e da empresa.

7. Perspectivas e Trabalhos Futuros

A empresa pode ainda elaborar outros projetos baseados neste trabalho:

- Levar em conta os efeitos de segregação durante a solidificação do lingote e, portanto, as diferenças de comportamento térmico e metalúrgico entre a matriz e as zonas segregadas.
- Aplicação deste estudo a todos os tipos de aço produzidos pela usina de Châteauneuf.
- Aplicação das novas normas de resfriamento a partir dos resultados deste projeto e de projetos futuros.
- Criação de um utilitário de ciclo de resfriamento que poderia ser consultado e utilizado no momento do pedido do cliente. Esta ferramenta determinaria o ciclo de resfriamento de uma placa a partir de certas informações, como o tipo de aço e as suas dimensões.

8. Referências Bibliográficas

- [1] BOSSON, J.; *Analyse de l'hydrogène dans les aciers*, Techniques de l'Ingénieur, Ref. M262, França, 1993.
- [2] BOURGES, P.; COUDREUSE, L.; GINGELL, A.; PILLOT, S.; *Hydrogen induced disbonding: from laboratory tests to actual field conditions*, p.4, Corrosion 2005, Paper n° 05573, França, 2005.
- [3] BOUVARD, J.; *Tôlerie Forte*, Techniques de l'Ingénieur, Ref. M7920, França, 1990.
- [4] BRASS, A.; CHÊNE, J.; COUDREUSE, L.; *Fragilisation des aciers par l'hydrogène : étude et prévention*, Techniques de l'Ingénieur, Ref. M175, França, 2000.
- [5] BRASS, A.; CHÊNE, J.; COUDREUSE, L.; *Fragilisation des aciers par l'hydrogène : mécanismes*, Techniques de l'Ingénieur, Ref. M176, França, 2000.
- [6] FABRÈGUE, J.; *Métallurgie du laminage à chaud*, Techniques de l'Ingénieur, Ref. M7860, França, 2000.
- [7] FRISCHKNECHT, R.; *Documentation of changes implemented in ecoinvent Data v1.2*; ecoinvent report n°16, Dübendorf, July 2005.
- [8] LOUIS-ROSE, S.; *Etude des conditions thermiques des lingots et brames CSP entre fin de solidification à l'aciérie et reprise à la tôlerie*; Relatório de estágio CRMC, França, 2004.
- [9] MONTMITONNET, P.; *Laminage : analyse thermomécanique et applications*, Techniques de l'Ingénieur, Ref. M3066, França, 2003.
- [10] MONTMITONNET, P.; *Laminage : objectifs et modélisation*, Techniques de l'Ingénieur, Ref. M3065, França, 2002.
- [11] MONTMITONNET, P.; *Laminage à chaud : théorie du laminage*, Techniques de l'Ingénieur, Ref. M7840, França, 1991.
- [12] POIRIER, D.R.; GEIGER, G.H.; *Transport Phenomena in Materials Processing*, TMS, USA, 1994.

Anexos

Sumário:

<i>Anexo 1: Lista de aços produzidos na usina de Châteauneuf e suas composições</i>	<i>80</i>
<i>Anexo 2: Normas de resfriamento aplicadas na usina de Châteauneuf.....</i>	<i>80</i>
<i>Anexo 3: Propriedades físicas e térmicas dos aços para molde (cálculos através das fórmulas de Goux).....</i>	<i>82</i>
<i>Anexo 4: Os aços para construção de moldes de injeção de plástico SP300® e SP400®.....</i>	<i>84</i>
<i>Anexo 5 : Arquivo de dados criado com o programa Forge2005® (extensão don)</i>	<i>86</i>
<i>Anexo 6: Arquivo material SP300® (extensão tmf)</i>	<i>90</i>
<i>Anexo 7: Comparação dos dados obtidos através da campanha de medidas com os resultados das simulações</i>	<i>93</i>
<i>Anexo 8: Resultados do ensaio de resfriamento de uma placa de 500 mm de espessura no Fraasil.....</i>	<i>97</i>
<i>Anexo 9: Diagrama TTT de um A516 grade 70.....</i>	<i>98</i>
<i>Anexo 10: Comparação dos resultados obtidos através do ensaio de resfriamento no Fraasil e da simulação numérica</i>	<i>99</i>
<i>Anexo 11: Diagrama TTT de um aço SP300®</i>	<i>100</i>
<i>Anexo 12: Tempo máximo de resfriamento ao ar segundo a espessura da placa após acabamento (ciclo de resfriamento otimizado).....</i>	<i>101</i>
<i>Anexo 13: Otimização do resfriamento ao ar para outros aços para molde.....</i>	<i>102</i>
<i>Anexo 14: Estudo da influência das propriedades do Fraasil no resfriamento de placas espessas</i>	<i>103</i>
<i>Anexo 15: Comparação dos ciclos de resfriamento antes e após otimização</i>	<i>106</i>

Anexo 1: Lista de aços produzidos na usina de Châteauneuf e suas composições

		Composição em 0,001%													
	Aço	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	S	P	Sn	V	B	N
C-Mn	SICLI300	190	1150	300	150	150	< 100	< 250	25	< 4	< 12	< 40			9
	SA 765 GrII	174	1150	300	350	150	75	< 200	25	< 4	< 10	< 40			9
	SA 508 Gr3	175	1400	225	575	≤ 250	490	≤ 200	22	≤ 4	≤ 10	40			9
	S355J2G3	180	1400	250	< 400	< 300	< 120	< 300	25	< 6	< 15	< 40			9
Molde	SP300	260	1400	100	1400	500	300	< 250	60	17	< 8	< 40		3	< 5
	SP400	250	1150	100	1000	2000	650	< 250	60	17	< 8	< 40	150	3	< 5
	W.1.2311	380	1470	300	550	1900	200	≤ 500	13	< 5	< 10	< 40			9
	W.1.2312	380	1470	350	550	1900	200	≤ 500	13	55	< 8	< 40			9
	W.1.2738	380	1470	300	950	1900	200	≤ 500	13	7	< 10	< 40			9

Anexo 2: Normas de resfriamento aplicadas na usina de Châteauneuf

Aços: SP300® e SP400®			
Espessura (mm)	Procedimento	Tempo de repouso ao ar	Tempo no Fraisil
200	AU	Ilimitado	0
250	AU	Ilimitado	0
300	AU	Ilimitado	0
350	AU	Ilimitado	0
400	AUF5	4h30	5 dias
450	AUF5	6h30	5 dias
500	AUF5	6h30	5 dias
550	AUF5	8h30	5 dias
600	AUF5	8h30	5 dias
650	AUF5	8h30	5 dias
700	AUF5	8h30	5 dias
750	AUF10	9h30	10 dias

Aço: AISI P20			
Espessura (mm)	Procedimento	Tempo de repouso ao ar	Tempo no Fraisl
200	F5	0	5 dias
250	F8	0	8 dias
300	F8	0	8 dias
350	F8	1h30	8 dias
400	F8	1h30	8 dias
450	F8	2h	8 dias
500	F8	2h	8 dias
550	F8	2h30	8 dias
600	F8	2h30	8 dias
650	F8	3h30	8 dias
700	F8	3h30	8 dias
750	F8	4h	8 dias

Aço: DIN W.1.2738			
Espessura (mm)	Procedimento	Tempo de repouso ao ar	Tempo no Fraisl
200	F5	0	5 dias
250	F5	0	5 dias
300	F5	0	5 dias
350	F5	0	5 dias
400	F8	1h30	8 dias
450	F8	2h	8 dias
500	F8	2h	8 dias
550	F8	2h30	8 dias
600	F8	2h30	8 dias
650	F8	3h30	8 dias
700	F8	3h30	8 dias
750	F8	4h	8 dias

Aços: DIN W.1.2311 e W.1.2312			
Espessura (mm)	Procedimento	Tempo de repouso ao ar	Tempo no Fraisl
200	F5	0	5 dias
250	F5	0	5 dias
300	F5	0	5 dias
350	F5	0	5 dias
400	F5	0	5 dias
450	F5	0	5 dias
500	F5	0	5 dias
550	F5	0	5 dias
600	F5	0	5 dias
650	F5	0	5 dias
700	F5	0	5 dias
750	F5	0	5 dias

Anexo 3: Propriedades físicas e térmicas dos aços para molde (cálculos através das fórmulas de Goux)

AFNOR 25CD4 - SP300® e SP400®			
Temperatura (°C)	Densidade (Kg/m³)	Calor específico (J/kg.K)	Condutividade térmica (W/m.k)
0	7847	440.3	42.83
50	7833	460.7	43.02
100	7818	481.4	43.00
150	7803	502.5	42.75
200	7787	524.0	42.29
250	7770	546.1	41.63
300	7753	569.0	40.80
350	7736	592.8	39.80
400	7718	617.9	38.68
450	7700	645.0	37.44
500	7681	674.9	36.13
550	7662	709.5	34.76
600	7643	752.1	33.36
650	7619	810.9	31.94
700	7603	910.0	30.53
740	7611	1086.0	28.46
775	7615	1160.8	26.99
800	7619	922.5	25.87
825	7612	866.6	25.16
850	7604	685.2	24.70
900	7579	630.5	25.43
950	7552	637.9	26.17
1000	7525	645.0	26.90
1050	7499	651.9	27.63
1100	7473	658.5	28.37
1200	7421	671.0	29.84
1300	7369	682.5	31.31
1400	7317	693.0	32.77

AFNOR 40 CMD 8 – AISI P20, DIN W.1.2738, W.1.2311, W.1.2312					
Temperatura (°C)	Densidade (Kg/m ³)	Temperatura (°C)	Calor específico (J/kg.K)	Temperatura (°C)	Condutividade térmica (W/m.k)
0	7847	157,0	509,6	0	48,5
50	7833	202,0	531,3	100	46,4
100	7818	252,0	551,2	200	44,4
200	7787	302,0	576,5	300	42,2
300	7753	352,0	605,4	400	38,4
400	7718	402,0	636,1	500	35,5
500	7681	452,0	670,4	600	31,3
600	7643	502,0	708,4	700	28,8
700	7603	552,0	755,4	800	25,9
800	7619	602,0	815,0	900	26,7
900	7579	652,0	887,3	1000	28
1000	7525	692,0	941,5	1100	28,8
1100	7473	712,0	1057,2	1200	30,1
1433	7303	747,0	1111,4	1400	32,2
1490	7052	777,0	1035,5	1420	32,4
1555	7019	807,0	1068,0	1501	39,9
1600	6991	817,0	596,3	1538	40,3
		857,0	603,6	1627	41,5
		907,0	610,8		
		957,0	618,0		
		1007,0	627,1		
		1057,0	634,3		
		1107,0	641,5		
		1157,0	650,6		
		1207,0	657,8		
		1257,0	665,0		
		1307,0	674,1		
		1357,0	681,3		
		1407,0	688,5		
		1457,0	697,5		
		1477,0	699,3		
		1507,0	813,2		
		1527,0	820,4		

Anexo 4: Os aços para construção de moldes de injeção de plástico SP300® e SP400®

Superplast® 300

Composição química

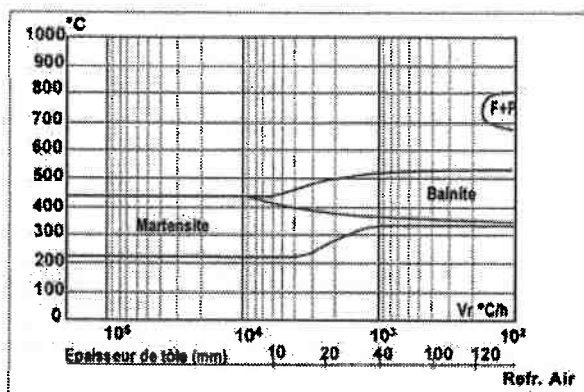
C	S max	P max	Cr	Mn	Mo
0.25	0.020	0.020	1.30	1.30	0.40

Propriedades

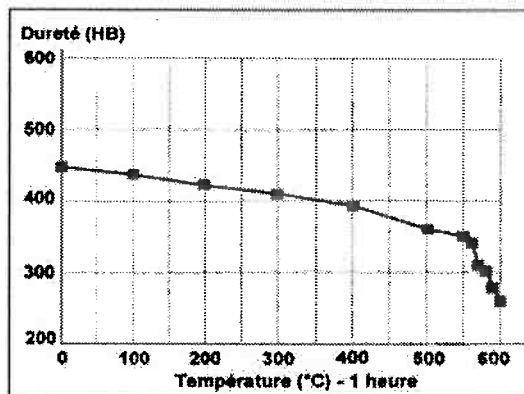
- Módulo de Young : 205 000 N/mm²
- Coeficiente de Poisson : 0,30
- Densidade : 7850 kg/m³
- Coeficiente de dilatação térmica : de 11,9E-6 a 13,1E-6 °C⁻¹
- Condutividade térmica : 40 W/m.°C

Este produto é entregue com uma dureza compreendida entre 290 e 320HB.

Diagrama TRC



Curva de revenimento



Superplast® 400

Composição química

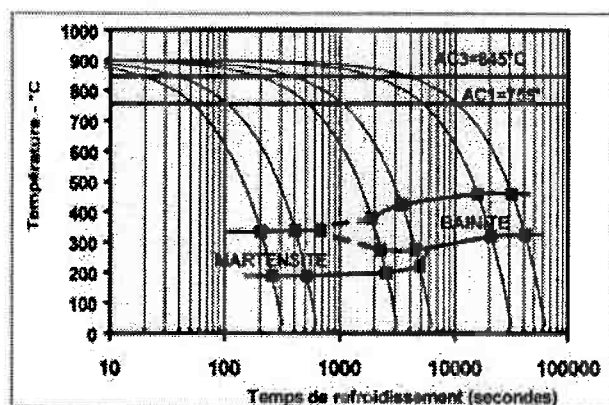
C	S max	P max	Cr	Mn	Mo
0.35	0.020	0.020	2.50	1.50	0.80

Propriedades

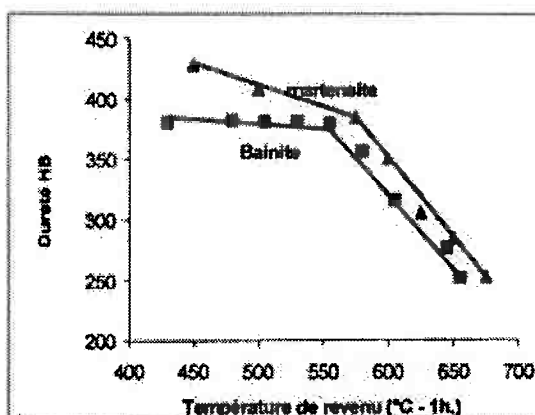
- Módulo de Young : 210 000 N/mm²
- Coeficiente de Poisson : 0,30
- Densidade : 7850 kg/m³
- Coeficiente de dilatação térmica : de 10,8E-6 à 12,91E-6 °C⁻¹
- Condutividade térmica : 38 W/m.°C

Este produto é entregue com uma dureza compreendida entre 350 e 380HB.

Diagrama TRC



Curva de revenimento



Anexo 5 : Arquivo de dados criado com o programa Forge2005® (extensão don)

```

! File Type:                FORGE2 V4.1 Data File
! Creator:                  GLPre Version 2, 7, 0, 15-Release - UNICODE
! Author:                   Carolina_MILEK_DE_ANDRADE
! Creation Date:            2006-06-20 11:01:30
! GLPre active language:    Francais
! System language:          Français (France)
! Data File Name:           500mm_essai_chateauf.ref
! Data File Location:
      D:\SIMULATION\FORGE2\TRAIT_THERM\Chateauf\SP300_Industeel_2006.tsv\500mm_essai_Chateauf
!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

===== OBJECTS Block
.OBJETS
      ProjectName = SP300_Industeel_2006
      SimulationName = 500mm_essai_Chateauf

Fres=results\500mm_essai_chateauf.res
Faux=results\500mm_essai_chateauf.vtf

      NBSD = 1

OBJET1,NAME=TOLE
OBJET1,FMAY=TOLE.may
OBJET1,NOMGEN=RESULTS\TOLE_
OBJET1,RHEOL=1

Nbproc=1,num=1
.FIN OBJETS
=====

===== FILE Block
.FICHIER
Fmay=tole.may
Fres=results\500mm_essai_chateauf.res
Faux=results\500mm_essai_chateauf.vtf
NomGen=results\tole_
      delete
.FIN FICHIER
=====

===== SENSORS Block
.CAPTEURS
  Capteur 1      ! (Definition_Capteurs1 group)
    x = 0
    y = 0
    z = 0
    Lagrangien
  Fin Capteur
  Capteur 2      ! (Definition_Capteurs1 group)
    x = 0.5
    y = 0
    z = 0
    Lagrangien
  Fin Capteur
  Capteur 3      ! (Definition_Capteurs1 group)
    x = 0
    y = 0

```

```

      z = 0.25
      Lagrangien
Fin Capteur
Capteur 4      ! (Definition_Capteurs1 group)
      x = 1
      y = 0
      z = 0
      Lagrangien
Fin Capteur
Capteur 5      ! (Definition_Capteurs1 group)
      x = 0.5
      y = 0
      z = 0.25
      Lagrangien
Fin Capteur
Capteur 6      ! (Definition_Capteurs1 group)
      x = 0
      y = 0
      z = 0.17
      Lagrangien
Fin Capteur
.FIN CAPTEURS
=====

===== UNITS Block
.UNITES
      M-MPA-SI
.FIN UNITES
=====

===== RHEOLOGY Block
.RHEOLOGIE
      !No rheological data
      ELASTIC

      ! Initial temperature has been set in mesh file: constant value = 890.000000
.FIN RHEOLOGIE
=====

===== THERMAL Block
.THERMIQUE
      !Thermal coefficients
      ! Material name: 25CD4 C=0.25 Mn=1.30 Cr=1.30 Mo=0.40
      ! Material type: Steels
      ! Properties type: thermal
      ! Units: kg, m, sec
      Loiv evol
      PointParPoint
      Par code_Dens=5 ! Variation suivant la temperature en °C"
      Par NBPTS_Dens=28
      Par X_Dens(28)= 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400,
                    450, 500, 550, 600, 650, 700, 740, 775, 800,
                    825, 900, 950, 1000, 1050, 1100, 1200, 1300, 1400
      Par Y_Dens(28)= 7847, 7833, 7818, 7803, 7787, 7770, 7753, 7736, 7718,
                    7700, 7681, 7662, 7643, 7619, 7603, 7611, 7615, 7619,
                    7612, 7604, 7579, 7552, 7525, 7499, 7473, 7421, 7369, 7317
      Var DENSITY= EXIST
      Fin LOI
      Loiv evol
      PointParPoint
      Par code_hcap=5! Variation suivant la temperature en °C"
      Par NBPTS_hcap=28

```

```

Par X_hcap(28)= 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400,
               450, 500, 550, 600, 650, 700, 740, 775, 800,
               825, 900, 950, 1000, 1050, 1100, 1200, 1300, 1400
Par Y_hcap(28)= 440.3, 460.7, 481.4, 502.5, 524, 546.1, 569, 592.8, 617.9,
               645, 674.9, 709.5, 752.1, 810.9, 910, 1086, 1160.8, 922.5,
               866.6, 685.2, 630.5, 637.9, 645, 651.9, 658.5, 671, 682.5, 693

```

```
Var HEAT CAPACITY= EXIST
```

```
Fin LOI
```

```
Loiv evol
```

```
PointParPoint
```

```
Par code_Cond=5! Variation suivant la temperature en °C"
```

```
Par NBPTS_Cond=28
```

```

Par X_Cond(28)= 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400,
               450, 500, 550, 600, 650, 700, 740, 775, 800,
               825, 900, 950, 1000, 1050, 1100, 1200, 1300, 1400

```

```

Par Y_Cond(28)= 42.83, 43.02, 43, 42.75, 42.29, 41.63, 40.8, 39.8, 38.68,
               37.44, 36.13, 34.76, 33.36, 31.94, 30.53, 28.46, 26.99, 25.87,
               25.16, 24.7, 25.43, 26.17, 26.9, 27.63, 28.37, 29.84, 31.31, 32.77

```

```
Var CONDUCTIVITY= EXIST
```

```
Fin LOI
```

```
!-----
```

```
FACELIBRE
```

```
!Thermal Exchange between "Tole" and air
```

```
! Unit = si
```

```
AlphatExt = 15.000000e+00 ! Transfert coefficient
```

```
TempExt = 20 ! Ambient Temperature
```

```
Epsilon = 0.8 !Emissivity
```

```
FIN FACELIBRE
```

```
!-----
```

```
.FIN THERMIQUE
```

```
!=====
```

```
!===== DIFFUSION Block
```

```
.DIFFUSION
```

```
Name Diffusion = HYDROGENE
```

```
LOIV EVOL
```

```
PointParPoint
```

```
Par Cod_Sol = 5
```

```
Par Nbpts_SOL = 32
```

```

Par X_Sol(32) = 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500,
               550, 600, 625, 650, 675, 700, 725, 750, 780, 800,
               815, 850, 900, 950, 1000, 1050, 1100, 1150, 1200, 1250,
               1300, 1350, 1400

```

```

Par Y_Sol(32) = 0.0011, 0.0043, 0.0125, 0.0287, 0.0563, 0.0982, 0.1567,
               0.2332, 0.3284, 0.4425,
               0.5750, 0.7252, 0.8065, 0.8918, 0.9809, 1.0736, 1.1698, 1.2693, 2.84, 3.97,
               4.914, 5.006, 5.131, 5.248, 5.359, 5.464, 5.562, 5.656, 5.744, 5.828,
               5.907, 5.983, 6.055

```

```
Var Solubilite = Exist
```

```
Fin Loi
```

```
LOIV EVOL
```

PointParPoint

Par Cod_Dif = 5

Par Nbpts_Dif = 32

Par X_Dif(32) = 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500,
550, 600, 625, 650, 675, 700, 725, 750, 780, 800,
815, 850, 900, 950, 1000, 1050, 1100, 1150, 1200, 1250,
1300, 1350, 1400

Par Y_Dif(32) = 7.90E-10, 1.55E-09, 2.65E-09, 4.07E-09, 5.81E-09, 7.83E-09,
1.01E-08, 1.26E-08, 1.52E-08,
1.80E-08, 2.09E-08, 2.23E-08, 2.38E-08, 2.53E-08, 2.68E-08, 2.83E-08,
2.99E-08, 1.87E-08, 9.47E-09,
1.08E-09, 1.23E-09, 1.46E-09, 1.71E-09, 1.98E-09, 2.27E-09, 2.57E-09,
2.89E-09, 3.22E-09, 3.57E-09,
3.92E-09, 4.29E-09, 4.66E-09

Var Diffusivite = Exist

Fin Loi

!-----

FACELIBRE

!Exchange between "Tole" and gas

SET = peau

PressionGaz = 0

FIN SET

FIN FACELIBRE

!-----

.FIN DIFFUSION

!=====

!===== INCREMENT Block

.INCREMENT

Delta Temperature = 5.000000e+000

.FIN INCREMENT

!=====

!===== EXECUTION Block

.EXECUTION

PLAN

dtsto = 9.000000e+002

Sans Visualisation

Marquage

.FIN EXECUTION

!=====

!===== CALCUL THERMIQUE FINAL Block

.CALCUL THERMIQUE FINAL

Temps Final = 8.100000e+003

Increment Temperature = 5.000000e+000

.FIN CALCUL THERMIQUE FINAL

!=====

!===== USER VARIABLES Block

.USERVAR

! *** User Variable Law: Oyane

Name = OYANE,

PINI = 0.,

```

      R1 = 3
! *** User Variable Law: LatAndCo
      Name = LATANDCO,
      PINI = 0.
! *** User Variable Law: LatAndCN
      Name = LATANDCN,
      PINI = 0.
.FIN USERVAR
=====

.PARALLEL
NPROC= 1
.FIN PARALLEL

```

Anexo 6: Arquivo material SP300® (extensão tmf)

```

{ Software= GLPre_V2.7 }

{ Supported_Software= FORGE2 }

{ Comments= Données pour diffusion H2}

{ Rheological_Units= m-MPa }
! Material name: 25CD4 / SP300
! Material type: Steels
! Material subtype: Cr-Mo Steels
! Properties type: thermic, diffusion
! Units: MPa,degC
! Validity domain:
! Temperature: 0 - 1400 °C
! Solubilité: ppm.bar^1/2
! Diffusivité: m^2/s

{ Rheological_Data_as_Text=
!No rheological data
ELASTIC
}

{ Diffusion_Data_as_Text=
Name Diffusion = HYDROGENE

LOIV EVOL

      PointParPoint

      Par Cod_Sol =      5

      Par Nbpts_SOL =  32

      Par X_Sol(32) =  100,150,200,250,300,350,400,450,500,
                        550,600,625,650,675,700,725,750,780,800,
                        815,850,900,950,1000,1050,1100,1150,1200,1250,
                        1300,1350,1400
      Par Y_Sol(32) = 0.0011,0.0043,0.0125,0.0287,0.0563,0.0982,0.1567,0.2332,0.3284,0.4425,
                        0.5750,0.7252,0.8065,0.8918,0.9809,1.0736,1.1698,1.2693,2.84,3.97,

```

4.914,5.006,5.131,5.248,5.359,5.464,5.562,5.656,5.744,5.828,
5.907,5.983,6.055

Var Solubilité = Exist

Fin Loi

LOIV EVOL

PointParPoint

Par Cod_Dif = 5

Par Nbpts_Dif = 32

Par X_Dif(32) = 100,150,200,250,300,350,400,450,500,
550,600,625,650,675,700,725,750,780,800,
815,850,900,950,1000,1050,1100,1150,1200,1250,
1300,1350,1400

Par Y_Dif(32) = 7.90E-10,1.55E-09,2.65E-09,4.07E-09,5.81E-09,7.83E-09,1.01E-08,1.26E-08,1.52E-08,
1.80E-08,2.09E-08,2.23E-08,2.38E-08,2.53E-08,2.68E-08,2.83E-08,2.99E-08,1.87E-08,9.47E-09,
1.08E-09,1.23E-09,1.46E-09,1.71E-09,1.98E-09,2.27E-09,2.57E-09,2.89E-09,3.22E-09,3.57E-09,
3.92E-09,4.29E-09,4.66E-09

Var Diffusivité = Exist

Fin Loi

}

{ External_Files_To_Copy= }

{ Thermal_Units= SI }

{ Thermal_Data_as_Text=

!Thermal coefficients

! Material name: 25CD4 C=0.25 Mn=1.30 Cr=1.30 Mo=0.40

! Material type: Steels

! Properties type: thermal

! Units: kg,m,sec

Loiv evol

PointParPoint

Par code_Dens=5 ! Variation suivant la temperature en °C"

Par NBPTS_Dens=28

Par X_Dens(28)= 0,50,100,150,200,250,300,350,400,
450,500,550,600,650,700,740,775,800,
825,900,950,1000,1050,1100,1200,1300,1400

Par Y_Dens(28)= 7847,7833,7818,7803,7787,7770,7753,7736,7718,
7700,7681,7662,7643,7619,7603,7611,7615,7619,
7612,7604,7579,7552,7525,7499,7473,7421,7369,7317

Var DENSITY= EXIST

Fin LOI

Loiv evol

PointParPoint

Par code_hcap=5! Variation suivant la temperature en °C"

Par NBPTS_hcap=28

Par X_hcap(28)= 0,50,100,150,200,250,300,350,400,
450,500,550,600,650,700,740,775,800,

```

      825,900,950,1000,1050,1100,1200,1300,1400
Par Y_hcap(28)= 440.3,460.7,481.4,502.5,524,546.1,569,592.8,617.9,
      645,674.9,709.5,752.1,810.9,910,1086,1160.8,922.5,
      866.6,685.2,630.5,637.9,645,651.9,658.5,671,682.5,693
Var HEAT CAPACITY= EXIST
Fin LOI

Loiv evol
PointParPoint
Par code_Cond=5! Variation suivant la temperature en °C"
Par NBPTS_Cond=28
Par X_Cond(28)= 0,50,100,150,200,250,300,350,400,
      450,500,550,600,650,700,740,775,800,
      825,900,950,1000,1050,1100,1200,1300,1400
Par Y_Cond(28)= 42.83,43.02,43,42.75,42.29,41.63,40.8,39.8,38.68,
      37.44,36.13,34.76,33.36,31.94,30.53,28.46,26.99,25.87,
      25.16,24.7,25.43,26.17,26.9,27.63,28.37,29.84,31.31,32.77
Var CONDUCTIVITY= EXIST
Fin LOI

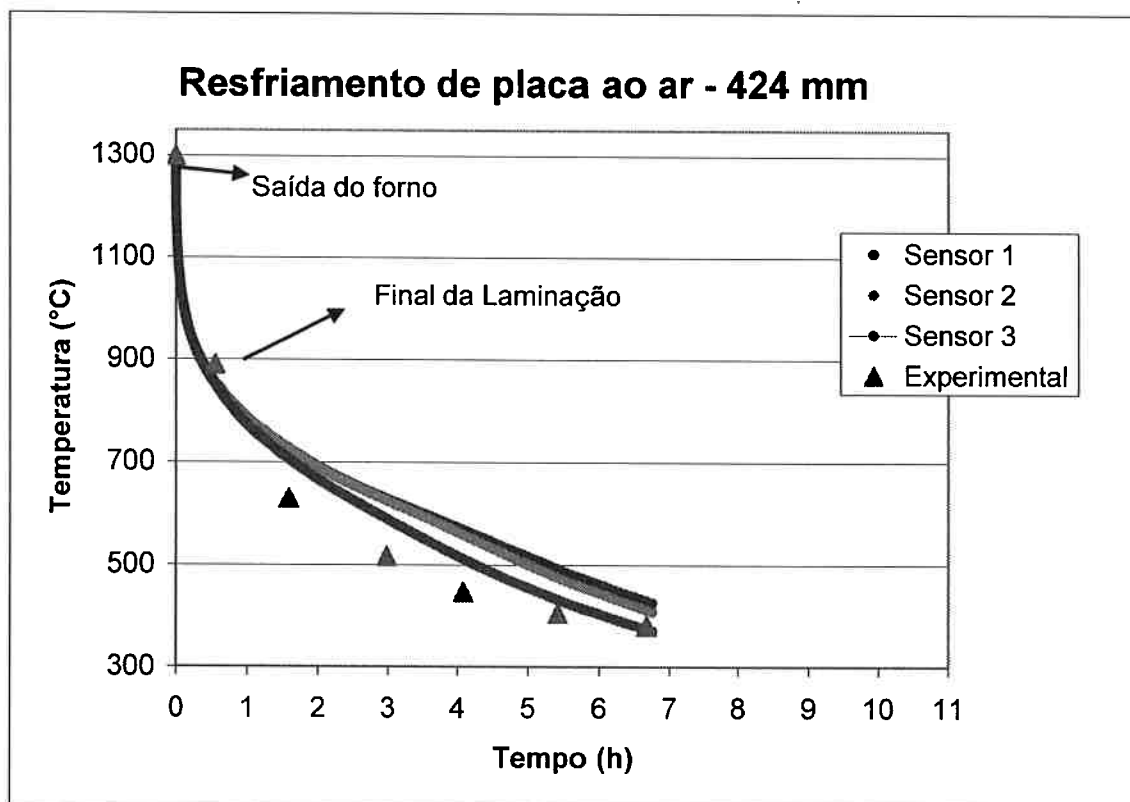
epsilon = 0.8 !Emissivity
}

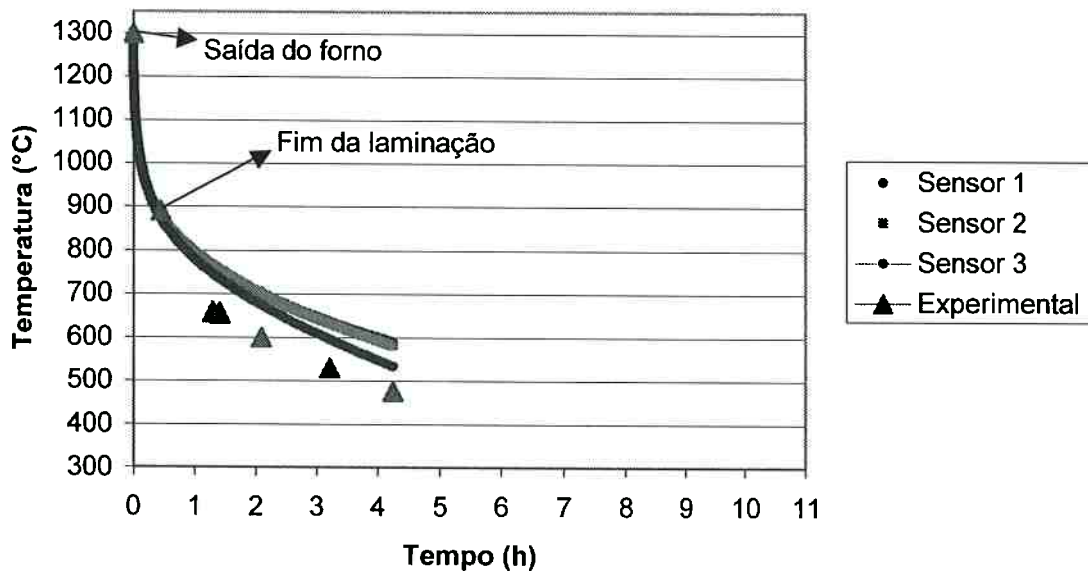
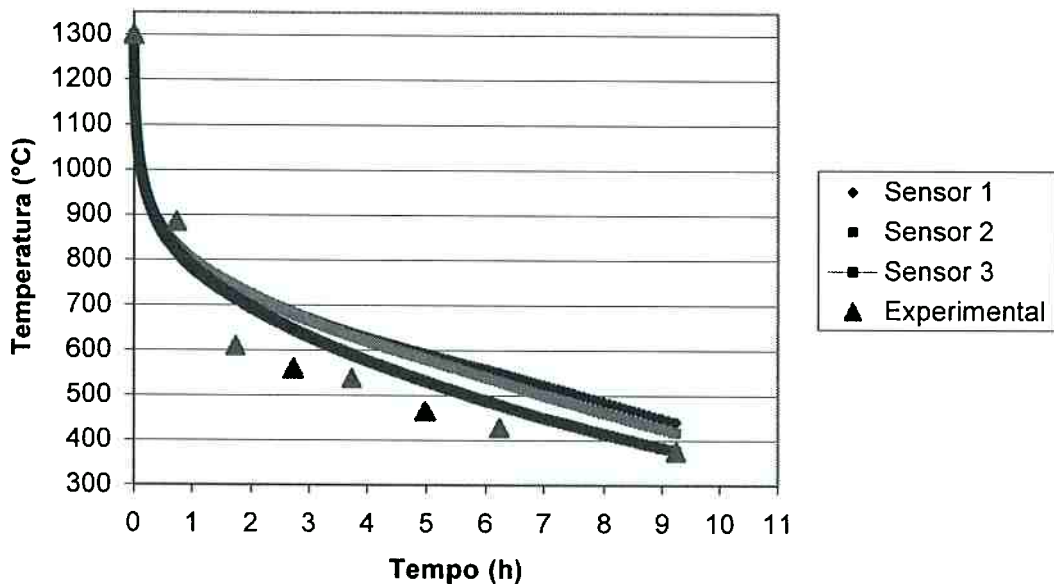
```

Anexo 7: Comparação dos dados obtidos através da campanha de medidas com os resultados das simulações

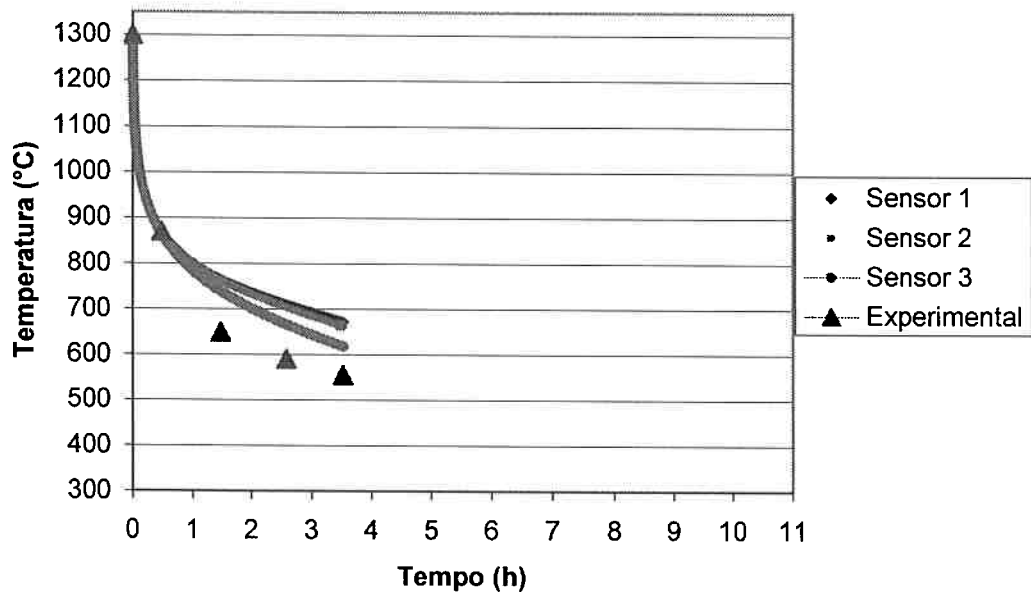
Observações:

- Os sensores indicam os resultados das simulações (Figura 24)
- A simulação foi efetuada com um coeficiente de troca de calor entre a placa e o ar de $10\text{W/m}^2\cdot\text{k}$.

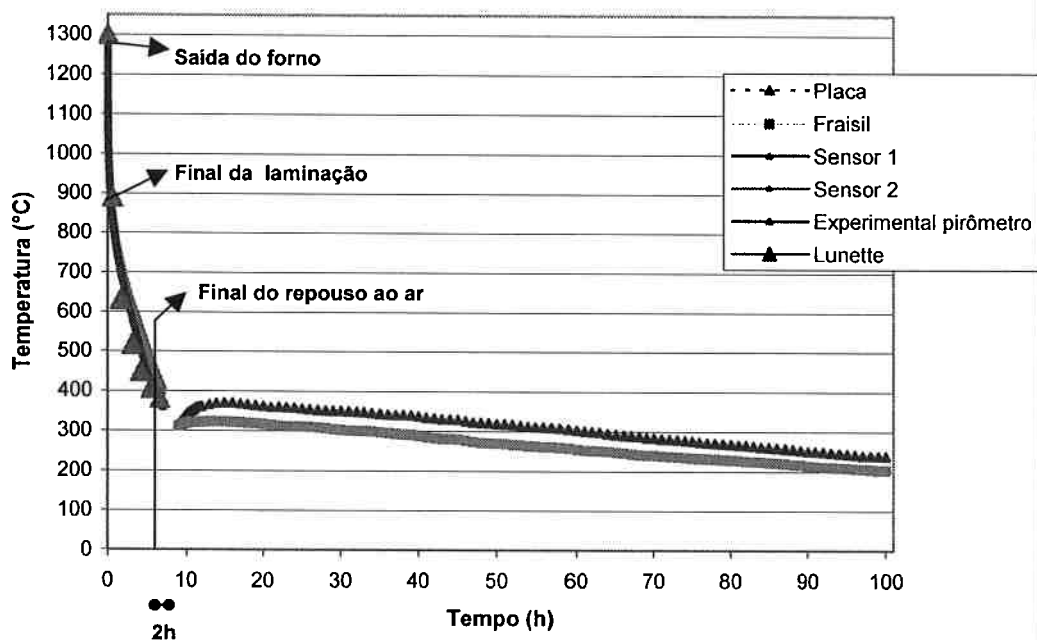


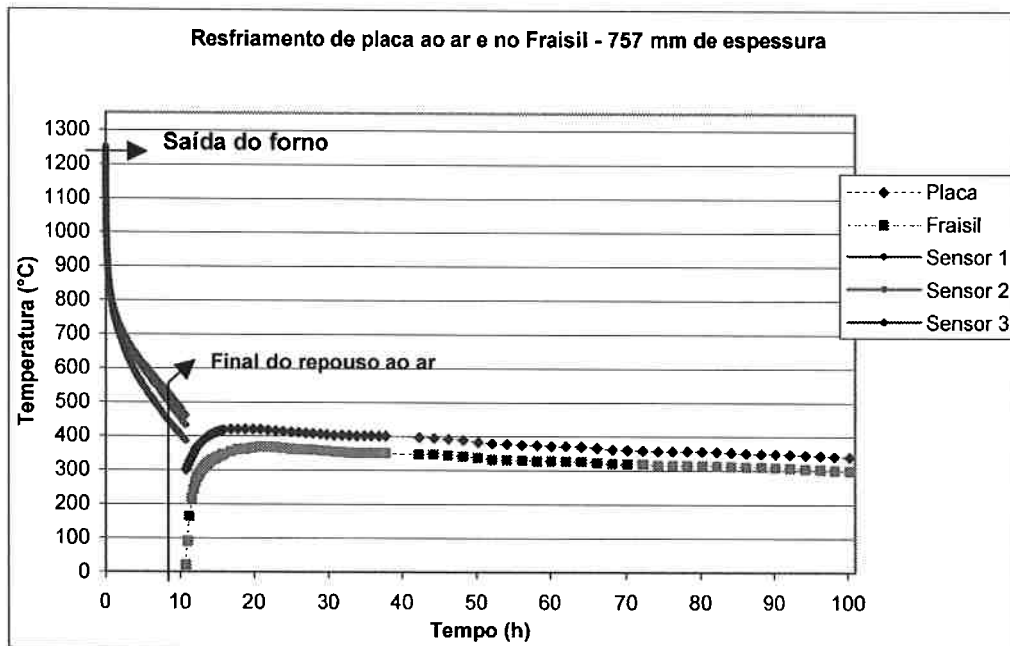
Resfriamento de placa ao ar - 490 mm de espessura**Resfriamento de placa ao ar - 596 mm de espessura**

Resfriamento de placa ao ar - 761 mm de espessura



Resfriamento de placa ao ar e no Fraisl - 424 mm de espessura





Anexo 8: Resultados do ensaio de resfriamento de uma placa de 500 mm de espessura no Fraasil

		Tempo (h)	T° a T/2	T° a 80 mm		Tempo (h)	T° a T/2	T° a 80 mm
Saída do forno	09/06/2006 07:15		890.0°	890.0°	10/06/2006 18:30	33:00	515.4°	508.4°
Transferência para o Fraasil	09/06/2006 09:15		750.0°	660.0°	10/06/2006 21:30	36:00	501.8°	494.0°
Entrar no Fraasil	09/06/2006 09:30	00:00	743.8°	654.5°	11/06/2006 00:30	39:00	488.5°	480.1°
	09/06/2006 10:00	00:30	717.8°	664.2°	11/06/2006 03:30	42:00	476.6°	467.7°
	09/06/2006 10:30	01:00	704.8°	672.3°	11/06/2006 06:30	45:00	465.0°	455.8°
	09/06/2006 11:00	01:30	696.0°	675.3°	11/06/2006 09:30	48:00	454.6°	445.2°
	09/06/2006 11:30	02:00	689.7°	675.7°	11/06/2006 12:30	51:00	444.1°	434.5°
	09/06/2006 12:00	02:30	684.8°	675.0°	11/06/2006 15:30	54:00	434.2°	424.6°
	09/06/2006 12:30	03:00	680.5°	673.6°	11/06/2006 18:30	57:00	424.5°	414.8°
	09/06/2006 13:00	03:30	676.4°	671.5°	11/06/2006 21:30	60:00	415.2°	405.3°
	09/06/2006 13:30	04:00	672.9°	669.6°	12/06/2006 00:30	63:00	405.9°	395.7°
	09/06/2006 14:00	04:30	669.4°	667.4°	12/06/2006 03:30	66:00	397.0°	386.8°
	09/06/2006 14:30	05:00	666.3°	665.1°	12/06/2006 06:30	69:00	388.7°	378.3°
	09/06/2006 15:00	05:30	663.5°	662.9°	12/06/2006 09:30	72:00	380.7°	370.4°
	09/06/2006 15:30	06:00	661.2°	661.2°	12/06/2006 12:30	75:00	372.9°	362.6°
	09/06/2006 16:00	06:30	659.3°	659.8°	12/06/2006 15:30	78:00	365.0°	354.9°
	09/06/2006 16:30	07:00	659.3°	659.3°	12/06/2006 18:30	81:00	356.4°	347.3°
	09/06/2006 17:00	07:30	659.8°	658.8°	12/06/2006 21:30	84:00	348.9°	Temperatura cortada
	09/06/2006 17:30	08:00	659.9°	658.4°	13/06/2006 00:30	87:00	340.7°	
	09/06/2006 18:00	08:30	659.5°	657.4°	13/06/2006 03:30	90:00	332.7°	
	09/06/2006 18:30	09:00	658.8°	656.2°	13/06/2006 06:30	93:00	324.9°	
	09/06/2006 19:00	09:30	657.4°	654.4°	13/06/2006 09:30	96:00	317.6°	
	09/06/2006 19:30	10:00	655.4°	652.0°	13/06/2006 12:30	99:00	310.4°	
	09/06/2006 20:00	10:30	652.9°	649.2°	13/06/2006 15:30	102:00	303.2°	
	09/06/2006 20:30	11:00	649.7°	646.0°	13/06/2006 18:30	105:00	298.5°	
	09/06/2006 21:00	11:30	645.8°	642.2°	13/06/2006 21:30	108:00	289.6°	
	09/06/2006 21:30	12:00	641.4°	638.2°	14/06/2006 00:30	111:00	283.1°	
	09/06/2006 22:30	13:00	631.6°	629.2°	14/06/2006 03:30	114:00	276.7°	
	09/06/2006 23:30	14:00	623.1°	620.9°	14/06/2006 06:30	117:00	270.5°	
	10/06/2006 00:30	15:00	614.9°	612.6°	14/06/2006 09:30	120:00	264.6°	
	10/06/2006 01:30	16:00	607.9°	605.3°	14/06/2006 12:30	123:00	258.8°	
	10/06/2006 02:30	17:00	600.9°	597.9°	14/06/2006 15:30	126:00	252.7°	
	10/06/2006 03:30	18:00	594.3°	591.0°	14/06/2006 18:30	129:00	247.1°	
	10/06/2006 04:30	19:00	587.9°	584.2°	14/06/2006 21:30	132:00	242.0°	
	10/06/2006 05:30	20:00	581.7°	577.7°	15/06/2006 00:30	135:00	236.4°	
	10/06/2006 06:30	21:00	576.4°	572.1°	15/06/2006 03:30	138:00	231.5°	
	10/06/2006 07:30	22:00	570.6°	566.0°	15/06/2006 06:30	141:00	226.8°	
	10/06/2006 08:30	23:00	565.0°	560.1°	15/06/2006 09:30	144:00	222.5°	
	10/06/2006 09:30	24:00	559.6°	554.5°	15/06/2006 12:30	147:00	218.1°	
	10/06/2006 12:30	27:00	544.0°	538.1°	15/06/2006 15:30	150:00	213.3°	
	10/06/2006 15:30	30:00	529.5°	523.0°			fin enreg.	

Anexo 9: Diagrama TTT de um A516 grade 70

A 516 grade 70

Température d'austénitisation : 1350°C 1s

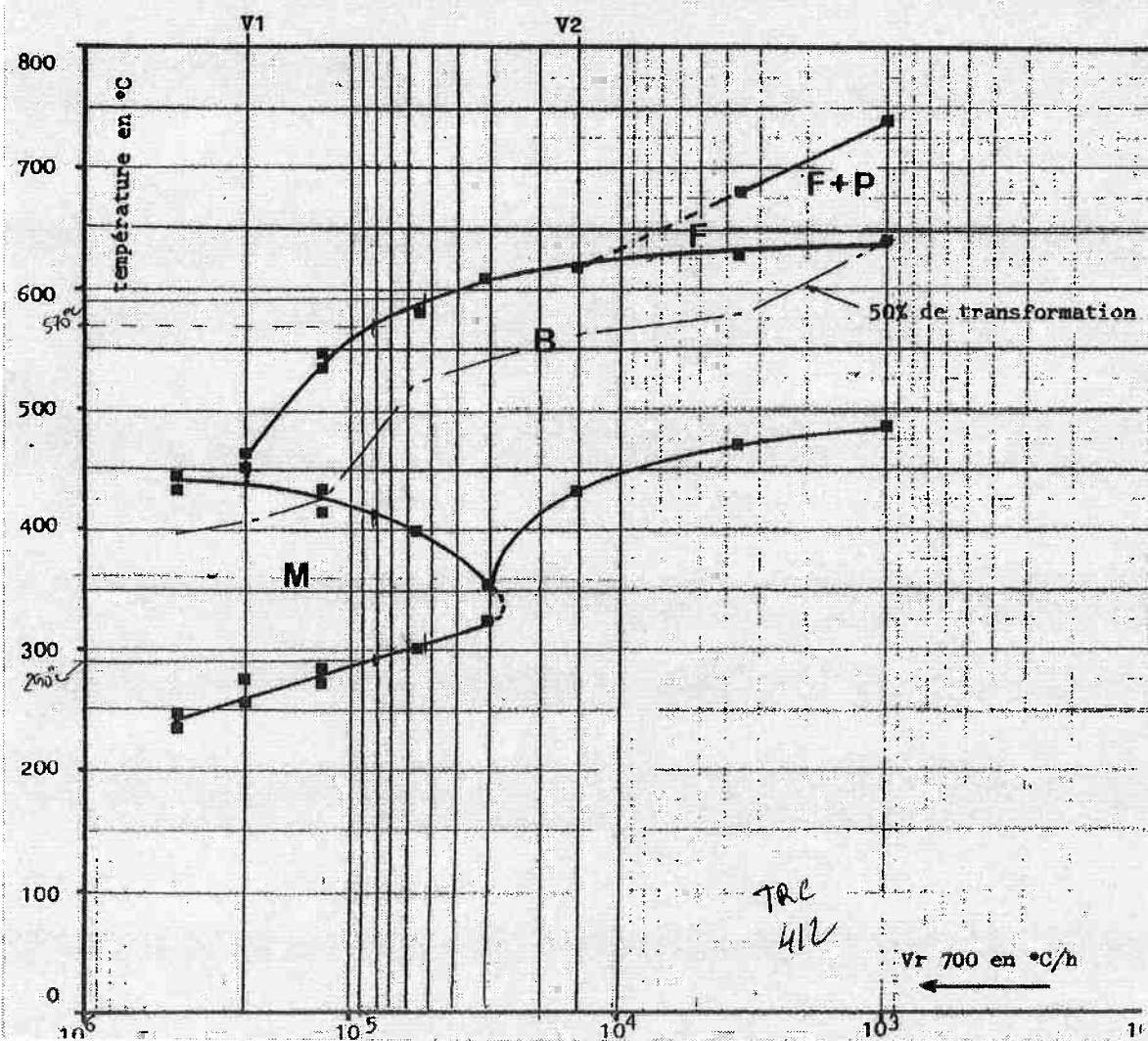
Vitesse de chauffage : 270°C/s

Grain : 4

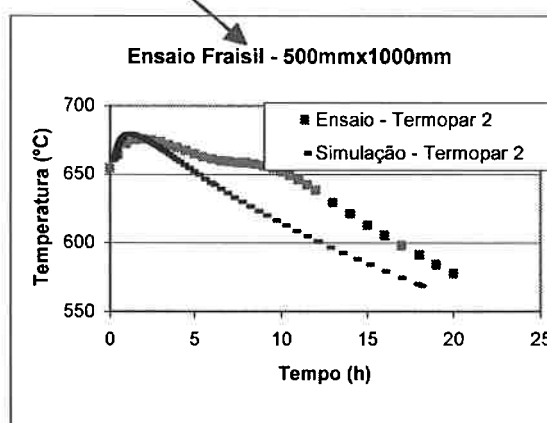
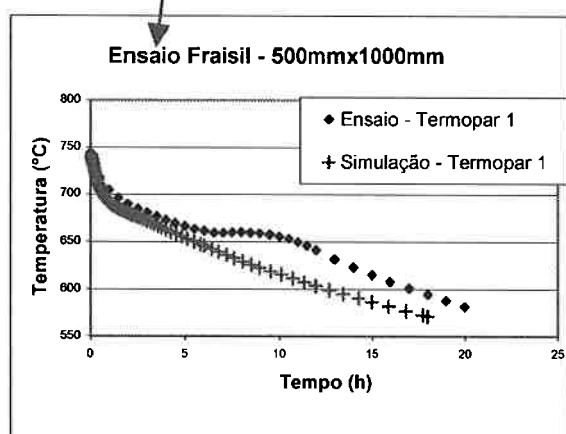
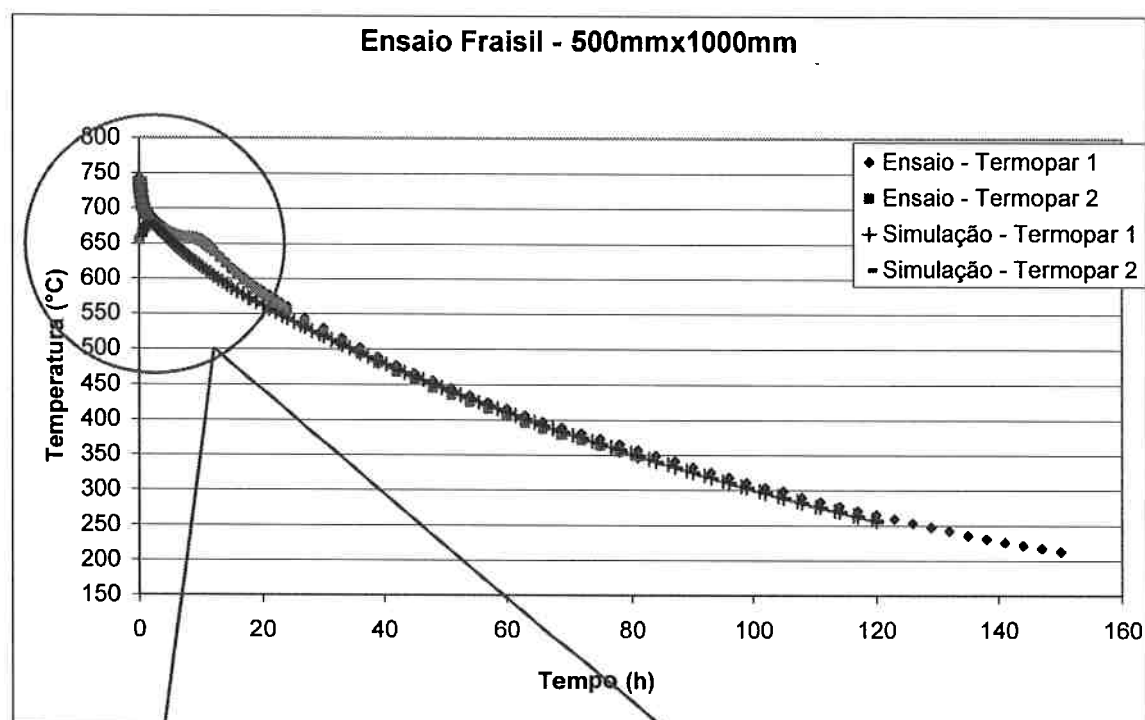
AC1 : 770°C

AC3 : 900°C

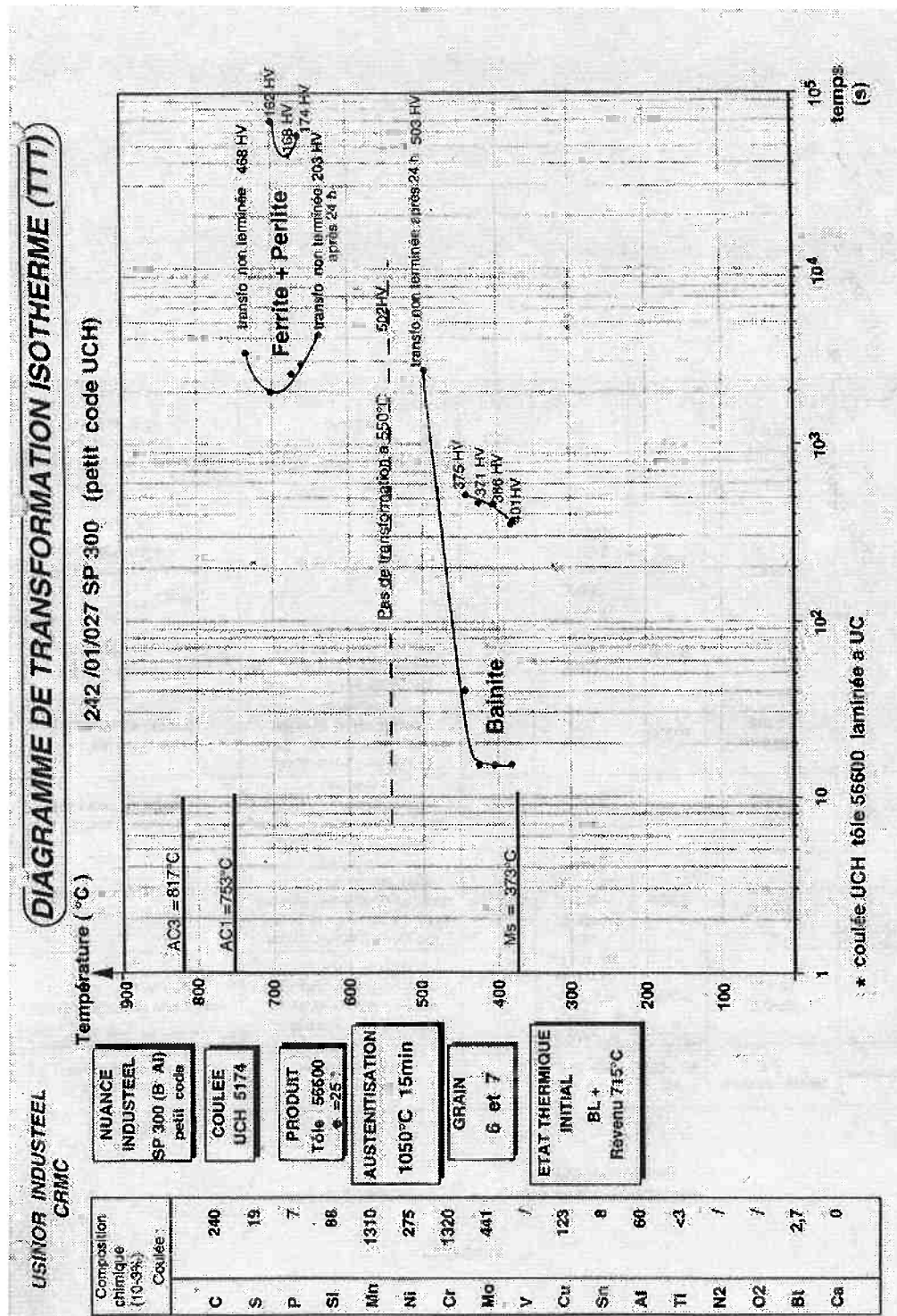
X poids	C	S	P	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Sn	Al	Co	Ti	Nb	O ₂	H ₂	N ₂
Coulée N°37 788	,159	,0005	,0053	,244	1,08	,245	,166	,050		,127	,008	,016	,013		,028	,0014	,00001	,0067



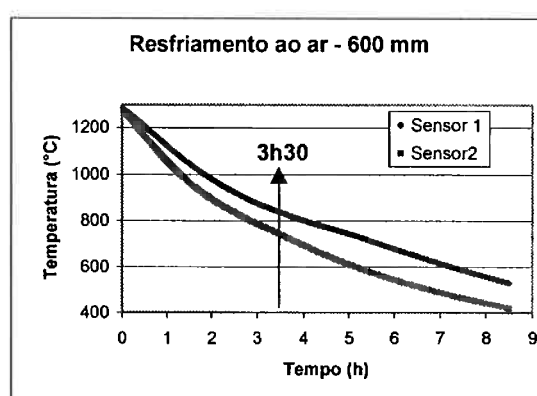
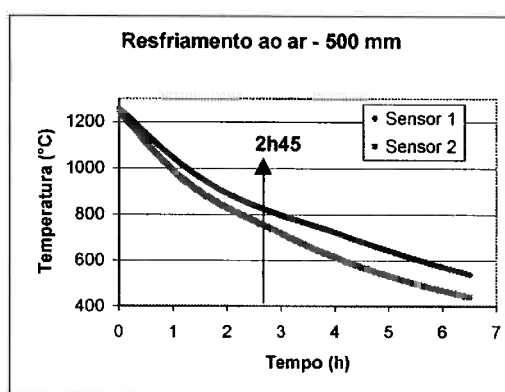
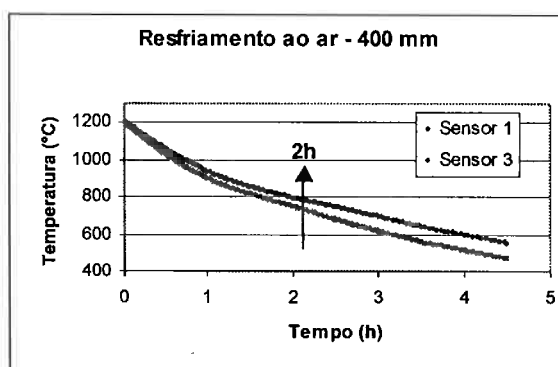
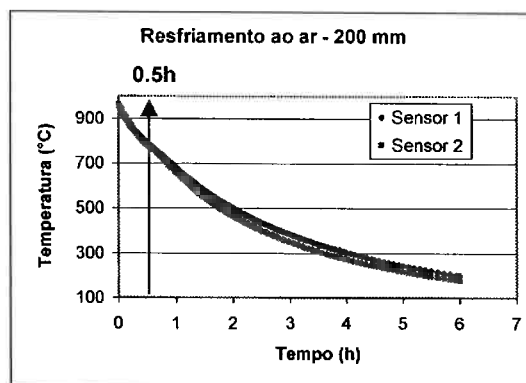
Anexo 10: Comparação dos resultados obtidos através do ensaio de resfriamento no Fraasil e da simulação numérica



Anexo 11: Diagrama TTT de um aço SP300®

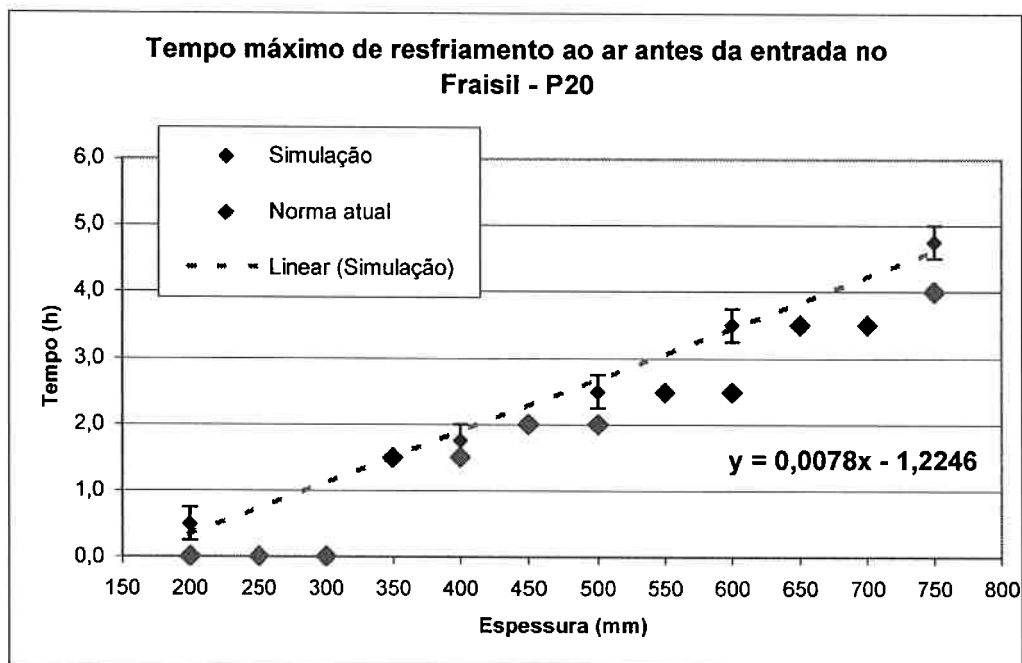


Anexo 12: Tempo máximo de resfriamento ao ar segundo a espessura da placa após acabamento (ciclo de resfriamento otimizado)

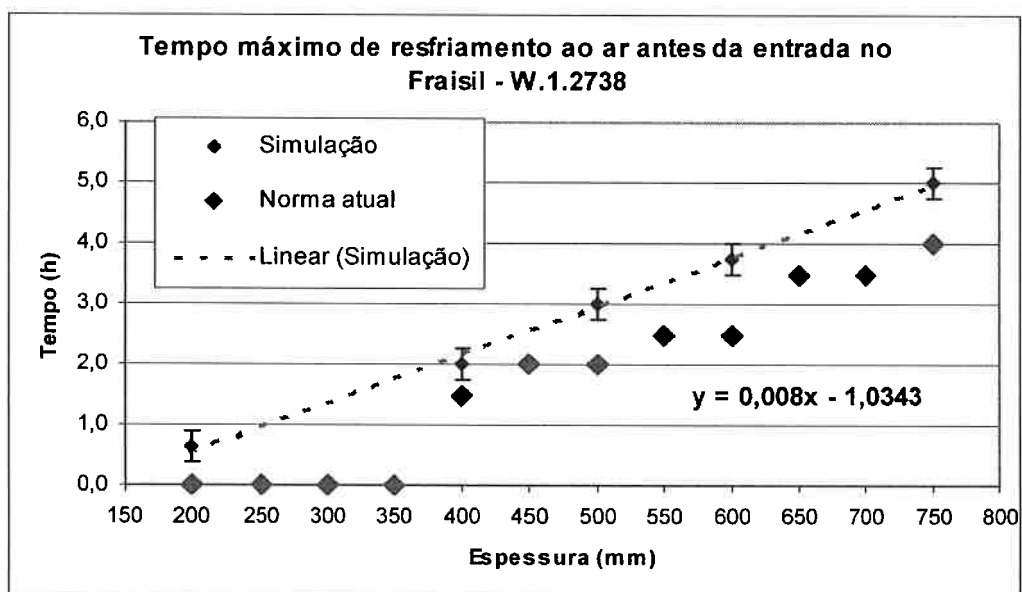


Anexo 13: Otimização do resfriamento ao ar para outros aços para molde

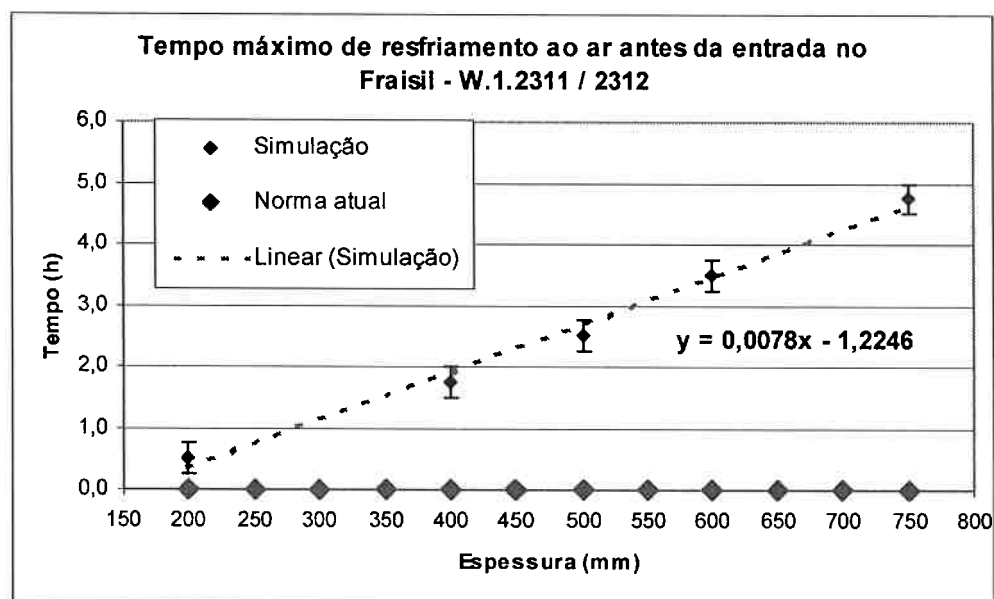
1) AISI P20



2) DIN W.1.2738

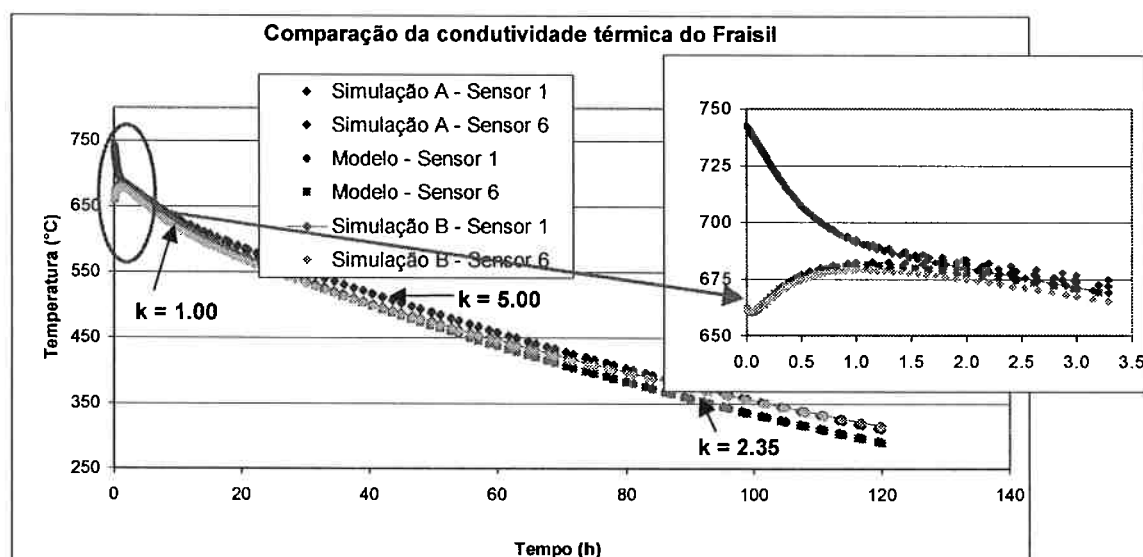


3) DIN W.1.2311 e W.1.2312

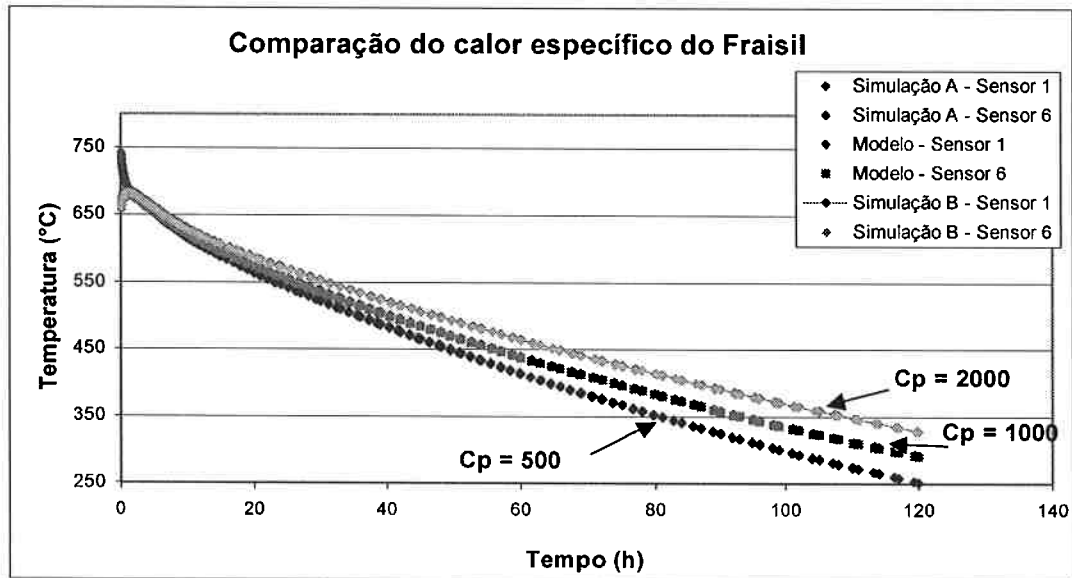


Anexo 14: Estudo da influência das propriedades do Fraisl no resfriamento de placas espessas

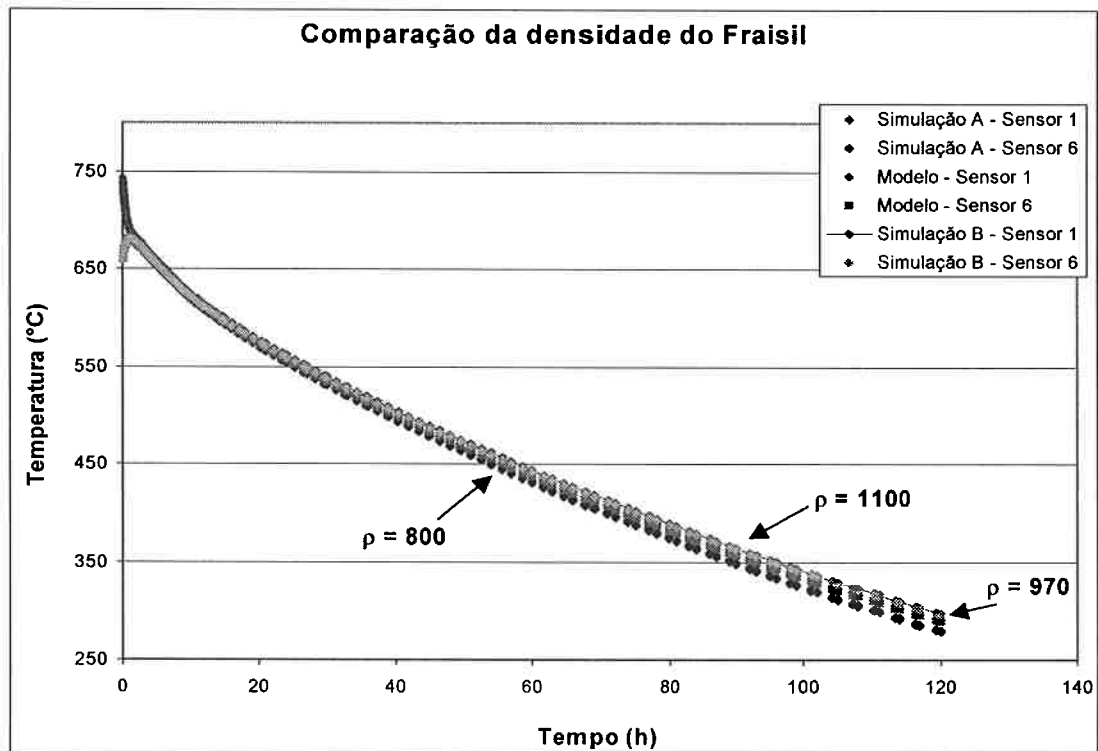
Conductividade térmica



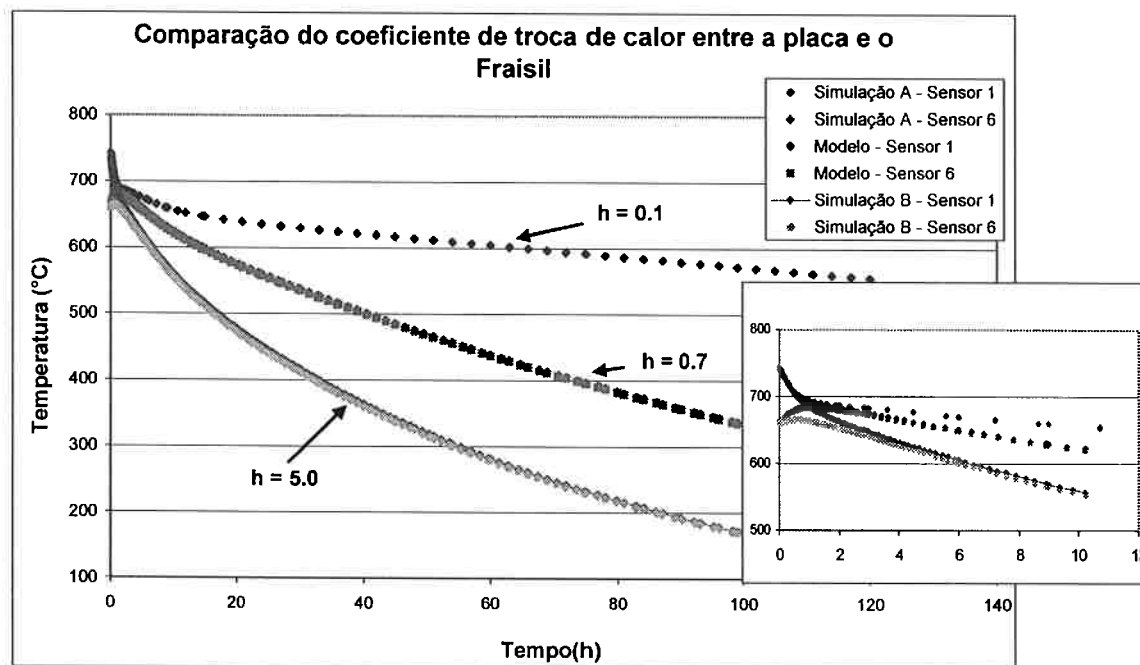
Calor específico



Densidade



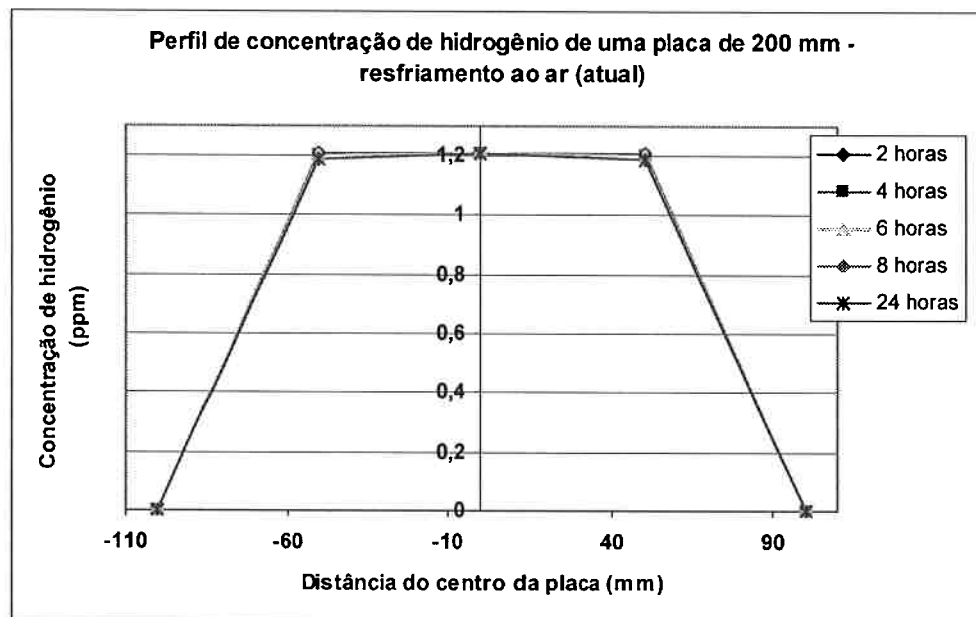
Coefficiente de troca de calor entre a placa e o Fraisl



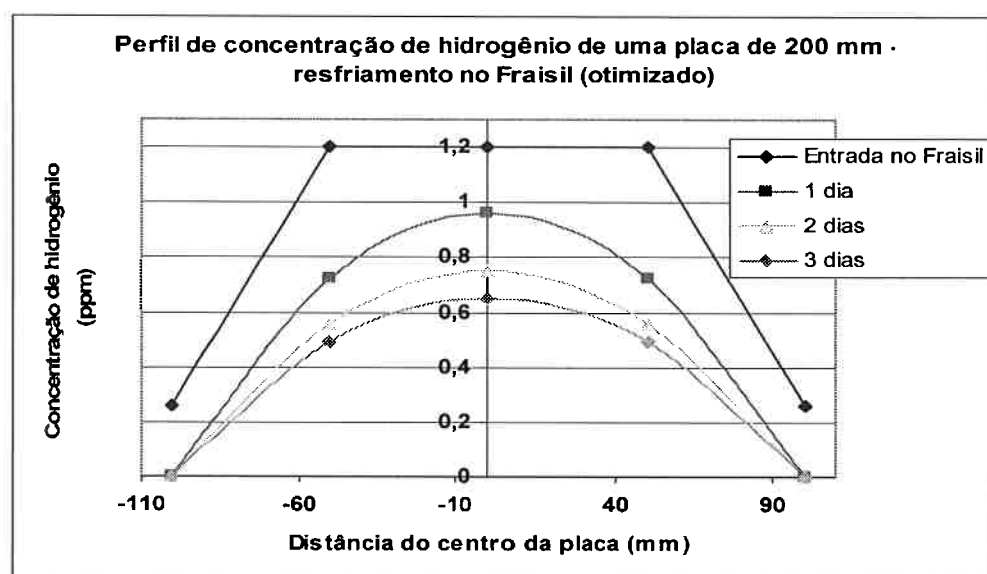
Anexo 15: Comparação dos ciclos de resfriamento antes e após otimização

Evolução da concentração de hidrogênio no plano de simetria para placas de 200, 500, 600 e 700 mm de espessura.

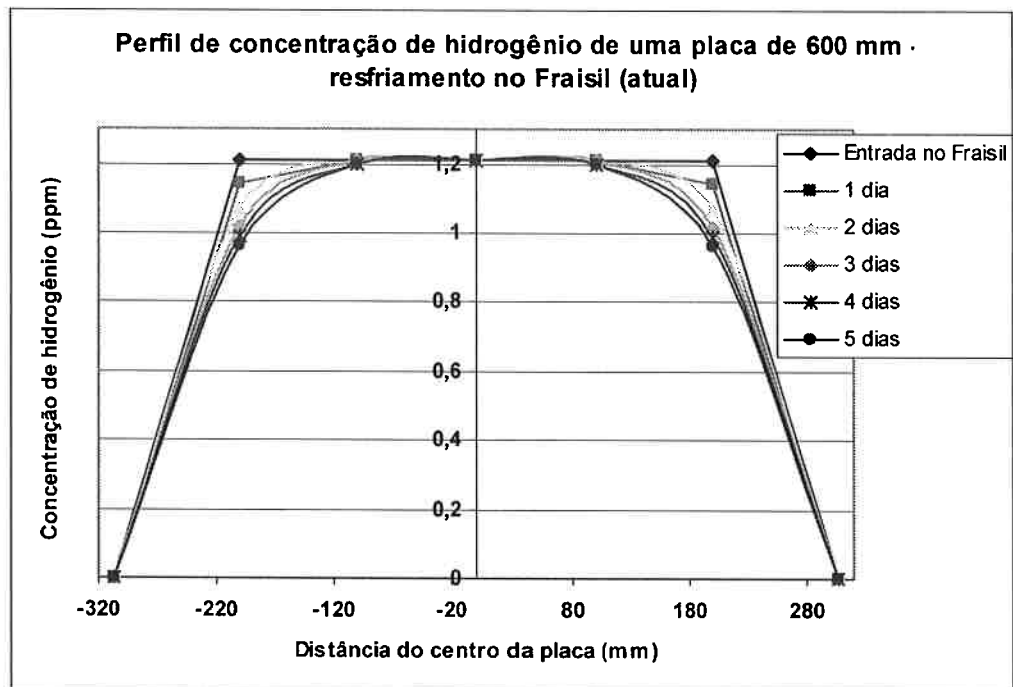
- 200 mm (ciclo atual)



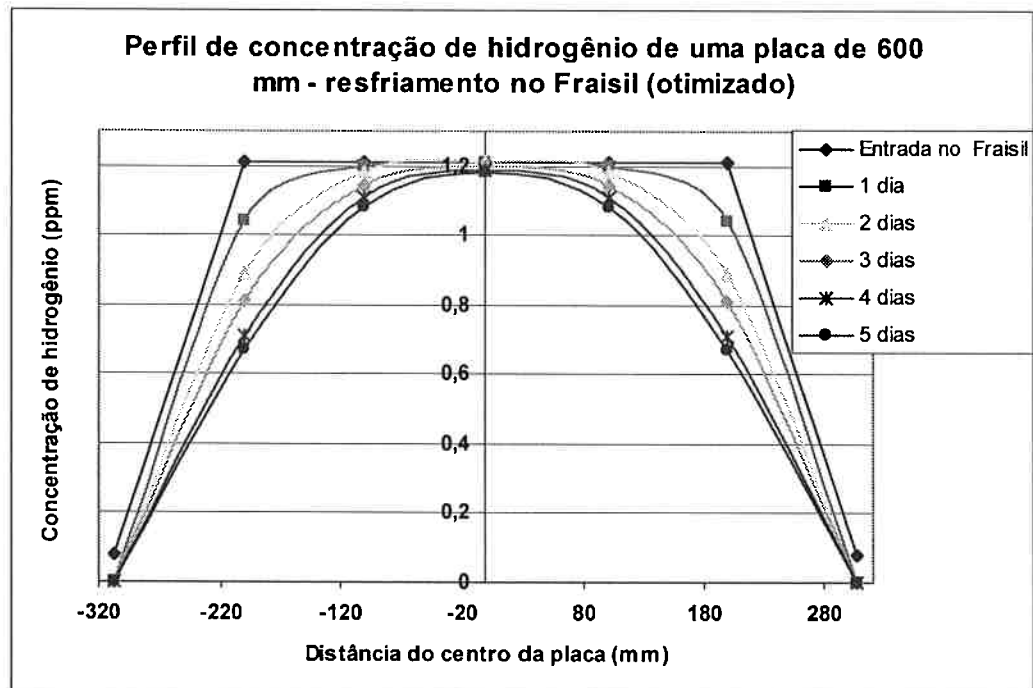
- 200 mm (ciclo otimizado)



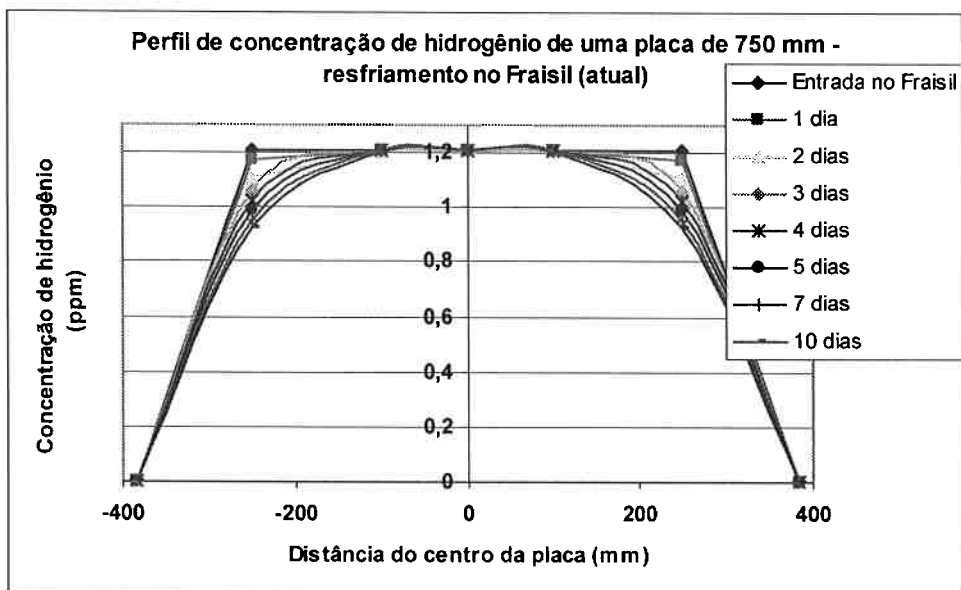
- 600 mm (ciclo atual)



- 600 mm (ciclo otimizado)



- 750 mm (ciclo atual)



- 750 mm (ciclo otimizado)

