

**THIAGO DE SOUZA AMARAL**

**ATLAS MICROESTRUTURAL PARA OTIMIZAÇÃO DE  
PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
2016**

**THIAGO DE SOUZA AMARAL**

**ATLAS MICROESTRUTURAL PARA OTIMIZAÇÃO DE  
PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM**

**Dissertação** apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Américo Scotti

**UBERLÂNDIA - MG  
2016**



Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

A485a      Amaral, Thiago de Souza, 1982-  
2016      Atlas microestrutural para otimização de procedimentos de soldagem  
/ Thiago de Souza Amaral. - 2016.  
175 f.

Orientador: Américo Scotti.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.  
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Solda e soldagem - Teses. 3.  
Microestrutura - Materiais - Teses. 4. Metais - Estrutura - Teses. I.  
Scotti, Américo, 1955-. II. Universidade Federal de Uberlândia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

---

*Aos meus pais.  
À minha esposa.  
Aos meus filhos.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus;

Ao meu orientador, Dr. Américo Scotti, pelo ensinamento, disponibilidade, amizade e paciência;

À minha família, pelo apoio incondicional, incentivo, paciência e compreensão pelas horas de ausência e dedicação;

Ao programa de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU, pela oportunidade;

À CBMM, por todo o suporte no desenvolvimento dos trabalhos e o incentivo para a formação contínua de seus profissionais;

À USIMINAS, CODEME, IWT e Laprosolda/UFU, pelo apoio técnico e laboratorial;

Aos Prof(s). Dr. Valtair Antônio Ferraresi, Dr. Louriel Oliveira Vilarinho e Dr. Ruhan Pablo Reis, pelos ensinamentos;

Aos amigos do Laprosolda, MSc. Lucas Alves do Nascimento, Eng. Luiz Carlos de Menezes Júnior, Eng. Thiago Resende Larquer e Dr. Thonson Costa Ferreira, pelo apoio;

Aos colegas de CBMM Marcos Alexandre Stuart Nogueira, Rogério Contato Guimarães, Gustavo Teixeira Silvestre, Leonardo Magalhães Silvestre, Marcelo Carboneri Carboni, Daniel Pallos Fridman e Marcos Paulo Meira, pelo apoio técnico na transição da engenharia elétrica para a área de soldagem;

Ao Dr. Eng. Peter Langenberg do IWT, Eng. Leonardo Turani e Eng. Tadeu Messias Borba da USIMINAS, Eng. Vaner Antunes de Lima da CODEME pelas discussões e apoio na execução das atividades experimentais.

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	6
2.1 Aços estruturais .....	6
2.2 Influências da composição em características do aço estrutural .....	8
2.3 Aços bainíticos .....	9
2.4 Soldabilidade de Aços bainíticos .....	10
2.5 Soldagem de aços bainíticos segundo a norma AWS D1.1 .....	12
2.6 Identificação das microestruturas na ZAC .....	16
2.7 Simulação física da ZAC .....	18
3 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL .....	20
3.1 Metodologia Geral .....	20
3.1.1 Especificação do aço a ser estudado .....	21
3.2 Técnicas Experimentais .....	22
3.2.1 Simulação de ciclos térmicos em dilatômetro .....	23
3.2.2 Avaliação da robustez do ensaio de dilatômetro .....	25
3.2.3 Simulação de ciclo térmico na Gleeble .....	25
3.2.4 Comparação de resultados das simulações com resultados de soldas reais .....	27
3.3 Memorial de cálculo de ganhos .....	28
4 VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DO AÇO SINCRO .....	29
5 ENSAIOS, RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	36
5.1 Simulação de ciclos térmicos em amostras do aço em dilatômetro .....	36
5.1.1 Dados do Ensaio Inicial .....	36
5.1.2 Caracterização dos microconstituintes e dureza nas amostras simuladas em dilatômetro (ensaio inicial) .....	38
5.1.3 Levantamento do diagrama CCT do aço Sincron após ensaio inicial .....	42
5.1.4 Avaliação da robustez dos resultados do ensaio em dilatômetro (ensaio robustez) .....	45
5.2 Simulação de amostras do aço em Gleeble .....	50
5.2.1 Caracterização de dureza e microestruturas das amostras simuladas na Gleeble .....	51
5.2.2 Caracterização de propriedades mecânicas das amostras simuladas na Gleeble .....	56
6 ATLAS DO AÇO SINCRO .....	59
6.1 Discussão geral sobre o uso do Atlas de Soldagem .....	59
6.2 Atlas de soldagem do aço Sincron .....	60

7 COMPARAÇÃO ENTRE AS SIMULAÇÕES E SOLDAS REAIS E ANÁLISE ECONÔMICA .....	67
7.1 Introdução .....	67
7.2 Estudo de caso 1: Soldagem SAW, posição plana, 25,4 mm, múltiplos passes, com e sem pré-aquecimento .....	68
7.2.1 Caracterização da placa de teste soldada com pré-aquecimento .....	68
7.2.2 Caracterização da amostra soldada sem pré-aquecimento .....	71
7.2.3 Comparação com o atlas .....	73
7.2.4 Aplicação de programas computacionais para cálculo de resfriamento $t_{8/5}$ e temperatura de pré-aquecimento .....	75
7.3 Estudo de caso 2: Solda SAW, posição T, $t = 25,4$ mm e 12,5 mm, múltiplos passes, sem pré-aquecimento, soldagem de aço ASTM A572 Grau 65 com ASTM A572 Grau 50 .....	79
7.3.1 Caracterização da placa de teste soldada .....	79
7.3.2 Comparação com resultados esperados no atlas .....	81
7.3.3 Aplicação de programas computacionais para cálculo de resfriamento $t_{8/5}$ e temperatura de pré-aquecimento .....	82
7.4 Estudo de caso 3: Solda FCAW, posição plana, $t = 25,4$ mm, múltiplos passes, sem pré-aquecimento, soldagem de aço ASTM A572 Grau 65 com ASTM A572 Grau 50 .....	85
7.4.1 Caracterização da placa de teste soldada .....	85
7.4.2 Comparação com resultados esperados no atlas .....	87
7.4.3 Aplicação de programas computacionais para cálculo de resfriamento $t_{8/5}$ e temperatura de pré-aquecimento .....	88
7.5 Cálculo de ganhos .....	91
8 CONCLUSÕES .....	93
9 TRABALHOS FUTUROS .....	94
10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	95
Apêndice I - INFORMAÇÕES DETALHADAS DOS ENSAIOS REALIZADOS .....	100
Anexo I - PROJETO DE NOVO PRÉDIO DE SECAGEM (CBMM, ARAXÁ, MG) ...	118
Anexo II - FABRICAÇÃO DO AÇO SINCRON PELA USIMINAS .....	122
Anexo III - RESULTADOS DOS TESTES PRELIMINARES .....	129
Anexo IV - ESPECIFICAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM .....	139

**Lista de Símbolos e Abreviaturas**

As	Início da transformação em austenita
Af	Fim da transformação em austenita
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
B	Bainita
Bf	Fim da transformação da bainita
BLAR	Aço de Baixa Liga e Alta Resistência (sinônimo de ARBL)
Bs	Início da transformação da bainita
CE	Carbono Equivalente
CRC	Curva de Transformação por resfriamento contínuo
CCT	Continuous cooling transformation curve (ver CRC)
EPS	Especificação de Procedimento de Soldagem
F	Ferrita
FCAW	Flux Cored Arc Welding (soldagem por arame tubular)
GCHAZ	Grain Coarsened HAZ (ver ZAC GG)
GRHAZ	Grain Refined HAZ (ver ZAC GF)
HSLA	High Strength Low Alloy Steel (ver BLAR)
HAZ	Heat Affected Zone (ver ZAC)
ICHAZ	Intercritical HAZ (ver ZAC IC)
IIW	International Institute of Welding
M	Martensita
Mf	Início da transformação da martensita
Ms	Fim da transformação da martensita

Pcm	Parâmetro crítico do metal para trincas em soldas
P	Perlita
P/Ff	Fim da transformação de perlita/ferrita
P/Fs	Início da transformação de perlita/ferrita
RQPS	Registro de Qualificação de Procedimento de Soldagem
RQS	Registro de Qualificação de Soldador
SAW	Submerged Arc Welding (soldagem por arco submerso)
SCHAZ	Subcritical HAZ (Ver ZAC SC)
t	Espessura de chapa
t8/5	Tempo de resfriamento entre 800 °C a 500°C
T	Temperatura
TMCP	Processo de conformação do aço a quente com resfriamento controlado (Thermomechanical Control Process)
ZAC	Zona Afetada pelo Calor
ZAC GF	Região de Refino de Grãos (Grãos Finos) da ZAC
ZAC GG	Região de Crescimento de Grãos (Grãos Grossos) da ZAC
ZAC IC	Região Intercrítica da ZAC
ZAC SC	Região Subcrítica da ZAC

AMARAL, T. S. **Atlas Microestrutural para Otimização de Procedimentos de Soldagem**. 2016. 175 f. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia.

## RESUMO

*Estruturas cada vez mais complexas e de maiores dimensões vêm aumentando a aplicabilidade de aços de baixa liga e alta resistência, devido à redução de peso e custo dessas estruturas. Um dos requisitos para o uso desses materiais é a manutenção do desempenho após soldagem. Entretanto, as normas em que se baseiam as Especificações de Procedimentos de Soldagem (EPS) ainda não consideram aços mais modernos em termos de rota de fabricação, o que pode fazer com que custos desnecessários de soldagem minimizem os ganhos da aplicação desses aços.*

*Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento e avaliação de uma metodologia para, experimentalmente, orientar a elaboração e o controle da aplicação de procedimentos de soldagem para aços estruturais, através de atlas microestrutural de regiões da zona afetada pelo calor (ZAC). Propõe-se que, através de um atlas microestrutural de um dado aço, seja possível determinar a faixa otimizada de energia de soldagem para um dado processo na elaboração e aplicação da EPS e, conseqüentemente, as velocidades de resfriamento que o aço possa sofrer durante a soldagem, sem perder as propriedades mecânicas e sem colocá-lo em risco quanto a trincas a frio.*

*Tomou-se como estudo de caso o aço produzido por laminação controlada de classe de resistência de 65 ksi (ASTM A572 Grau 65), utilizado em um projeto de um prédio industrial na empresa CBMM. Trata-se de um aço fabricado pelo processo TMCP com resfriamento acelerado. A elaboração do Atlas se deu através da construção de um diagrama CCT, por simulação física (dilatômetro e Gleeble), da região de grãos grosseiros da zona afetada pelo calor (ZAC GG). Foram feitas caracterizações metalográficas e mecânicas das regiões simuladas. Microestruturas de soldas realizadas com EPS qualificadas foram comparadas com as do Atlas para se certificar da adequabilidade dos parâmetros utilizados e validação da abordagem. Foram realizadas ainda a qualificação e quantificação de potenciais benefícios econômicos no citado projeto industrial, obtidos pelo uso desta metodologia.*

*As microestruturas apresentadas no mapa variavam de martensita, para altas taxas de resfriamento, até perlita/ferrita de tamanho de grão elevado, para baixas taxas de resfriamento. Observou-se notável predominância da microestrutura bainítica em uma larga faixa de taxas de resfriamento, compatível com as propriedades e composição do aço estudado (alta soldabilidade). As comparações com as microestruturas de soldas reais mostraram que o Atlas pode descrever de forma precisa o ciclo térmico efetivamente imposto*



*na ZAC GG. Concluiu-se que a aplicação desta metodologia na elaboração de novas EPS permitiria uma maior flexibilidade nos procedimentos de soldagem, admitindo inclusive soldagem sem pré-aquecimento. Em relação a não necessidade de pré-aquecimento, pode-se prever uma economia significativa de custos e redução de emissão de gases que provocam efeito estufa.*

**Palavras-Chave:** Especificação de Procedimento de Soldagem; Atlas Microestrutural; Dilatometria; Gleeble; Aços Estruturais; Aços de Baixa Liga e Alta Resistência; Diagrama CCT.

AMARAL, T. S. **Microstructural Atlas for Welding Procedure Optimization**. 2016. 175 f. MSc. Thesis, Federal University of Uberlândia, MG, Brazil.

## ABSTRACT

*More complex and bigger structures have increased the applicability of low alloy high strength steels due to weight and cost reductions in these projects. One of the requirements for the use of these materials is the preservation of performance after welding. Meanwhile, the norms on which the Welding Procedures Specifications (WPS) are based have not yet considered the development of modern steel and its new production process, resulting in unnecessary welding costs that diminish the profits of the application of this type of steel. This thesis aimed to develop and evaluate an experimental methodology to guide the creation and control of welding procedures for structural steel through a microstructural atlas of the heat affected zone (HAZ) in a thermomechanical control process (TMCP), 65 ksi steel (ASTM A572 Grade 65). This steel was used in the project of an industrial building for CBMM in Araxá, Minas Gerais, Brazil.*

*It is proposed that through a microstructural atlas of a given steel, it is possible to determine the range of cooling rates that the steel may suffer during welding without affecting mechanical properties and without risking cold cracks. When comparing the microstructure of steel welds performed in field conditions, it is possible to determine the heat input range for a given process in the preparation of a WPS.*

*The selected case study is from a high strength low alloy class 65 ksi steel (ASTM A572 Grade 65) that was used in the structure of an industrial building. The steel was produced using TMCP. The atlas was created via the construction of a continuous cooling transformation diagram – using physical simulation (dilatometer and Gleeble) – of the coarse grain HAZ (GCHAZ). The characterization of the simulated region was performed by metallography and mechanical tests. The microstructure of real welds made by a qualified WPS were compared to the atlas in order to certify the correct use of parameters and to validate the method. The methodology was also qualified and the potential economic benefits were quantified (based only on the reduction of consumables used and the increased availability of the welding process machine) for the selected industrial project.*

*The mapped microstructures varied from martensite (at high cooling rates) to pearlite/ferrite with large grain size (at low cooling rates). There was remarkable prevalence of bainitic microstructure in a wide range of cooling rates, consistent with the chemical composition of the steel studied. Comparisons with real weld microstructures showed the atlas is compatible with them, and that it can more accurately describe the effective thermal cycle*

*that occurs in the coarse grain region of the HAZ (other regions were not included). The application of this methodology in the development of new WPS would allow greater flexibility in the welding procedures, including welding without preheating. In this respect alone, it was possible to forecast savings of approximately R\$200,000.00, 1,000 hours of processing and 172 tonnes of carbon equivalent emissions.*

**Keywords:** Welding, microstructural atlas, thermal simulation, structural steels, high strength low alloy steel, continuous cooling transformation diagram.

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

Como é de conhecimento geral, o aço tem uma posição de relevância, pois combina resistência mecânica, trabalhabilidade, disponibilidade e baixo custo. Assim sendo, é fácil compreender a importância e a extensão da aplicação dos aços em estruturas, quer as fixas, como de edifícios, pontes, etc., quer móveis, na indústria ferroviária, automobilística, naval, aeronáutica, etc. (CHIAVERINI, 2012).

O setor de aços estruturais tem se desenvolvido nos últimos anos de forma bastante rápida, devido ao aumento dos custos e redução da disponibilidade de mão-de-obra na construção civil. Aliado a este novo cenário, os custos de transporte e locação de máquinas e equipamentos de montagem, como guindastes e gruas, tem sofrido acréscimo com o aumento do preço dos combustíveis e maior demanda de mercado.

Desta forma, segundo Fluess et al. (2010), é muito importante reduzir o peso e custo em construções. Isto pode ser feito através da economia de material, ou, em outras palavras, pela redução da espessura das chapas utilizando aços de maior resistência mecânica. Um exemplo prático desse conceito é dado por Silvestre et al. (2012), que demonstrou economia de 22% em peso de aço na estrutura projetada para o prédio da unidade de Sinterização II na CBMM em Araxá, MG, Brasil. Isto se deu com a utilização de um aço estrutural da classe ASTM A572 Grau 50 em substituição a uma estrutura com aço carbono convencional classe ASTM A36.

Meester (1997) anuncia que uma nova geração de aços estruturais de baixa liga e alta resistência (BLAR) e aços para tubulações produzidos por conformação termomecânica (TMCP) já estão disponíveis. Esses aços, que foram inicialmente desenvolvidos para atender as necessidades das indústrias de petróleo e gás, apresentam aumento de aplicação em outras variedades de estruturas. Eles são caracterizados pelo aumento da resistência à tração e tenacidade, conjuntamente com a redução do carbono equivalente (garantindo uma excelente soldabilidade). Fluess et al. (2010) chamam atenção de que para construções complexas a trabalhabilidade do aço é um ponto essencial. O “design” da nova geração de

aços, devido ao baixo carbono equivalente, demandam requisitos menores em termos de temperatura de pré-aquecimento e interpasse durante a soldagem, além de melhorar sua conformabilidade.

Já um exemplo de redução de peso em estruturas com a utilização de aços com menor carbono equivalente seria o estudo que motivou este trabalho, ou seja, o desenvolvimento de um prédio de secagem de concentrado refinado de nióbio, também na CBMM em Araxá (anexo I). Devido à utilização de aço ASTM A572 Grau 65, este estudo previu 7% de redução de custo final devido ao aço em comparação a uma estrutura em aço ASTM A572 Grau 50.

Porém, Meester (1997) explica que a composição química e microestrutura são os responsáveis pela resistência e tenacidade destes aços. Lan et al. (2011) citam que o excelente balanço entre resistência à tração e tenacidade obtidos com os aços de laminação controlada podem ser perturbados pelos ciclos térmicos de soldagem, que se caracterizam por rápido aquecimento, alto pico de temperatura e resfriamento descontrolado. A variação de microestrutura na zona afetada pelo calor (ZAC) pode produzir regiões (subzonas) com baixa tenacidade local, assim como com fragilidade localizada, como, por exemplo, nas regiões de grãos grosseiros e intercrítica da ZAC.

De acordo com Adonyi (2006), a zona afetada pelo calor apresenta uma mistura complexa de microestruturas em um volume muito pequeno próximo da zona fundida. Desta forma, a propriedade de uma única microestrutura se torna difícil de medir em uma solda real, sendo, portanto, a previsão de onde ela deverá falhar em serviço difícil de se mensurar. Ainda, segundo Lan et al. (2011), a propriedade destas regiões tem se deteriorado mais nitidamente com a aplicação de procedimentos de soldagem com elevada energia imposta em aços bainíticos convencionais de alta resistência, os quais têm como objetivo aumentar a eficiência e reduzir custos com o processo de união.

Assim, para o aproveitamento completo dos benefícios associados à utilização de aços de nova geração, é necessário desenvolver procedimentos de soldagem adequados e que garantam que todas as regiões das juntas (metal de base, zona afetada pelo calor, zona fundida) atendam às propriedades requeridas e estejam livres de defeito. Neste contexto, Holsberg & Wong (1990) explicam que aços de baixa liga e alta resistência têm o potencial de serem soldados com pouco ou nenhum pré-aquecimento e com menos restrições de controle de processo em relação aos aços de alta resistência com alto carbono, reduzindo significativamente os custos no processo de fabricação. Esta constatação não é, entretanto, retratada nos procedimentos de soldagem padrões que utilizam normas de soldagem, como a AWS D1.1, que não tratam separadamente os aços de nova geração e os aços estruturais convencionais. Por isto, os procedimentos de soldagem qualificados por esta norma a serem aplicados são, a princípio, conservadores e, portanto, trazendo maior custo.

Assim, um estudo mais aprofundado da soldabilidade destes aços se fez necessário para melhor entender limitantes no processo de fabricação de novas estruturas, de forma a responder a seguinte questão: é possível aumentar a confiabilidade da resposta metalúrgica dos parâmetros de soldagem selecionados em elaboração de EPS para aços estruturais e, assim, tornar as EPS menos conservativas e mais econômicas?

Um estudo para responder esta questão pode ser realizado tanto através de soldas reais ou por soldas simuladas. Em relação aos estudos com soldas reais, Adonyi (2006) explica que esforços foram realizados em forma de tornar testes padrões de soldas reais mais representativos. Porém, experimentos reais introduzem muitas fontes de erro devido a diferença na habilidade dos operadores (principalmente quando são realizados testes através de soldas manuais com diferentes soldadores), mudança da eficiência de transferência de calor de um processo para outro e muitas outras variáveis relacionadas a operacionalidade. O erro inerente ao próprio processo de ensaio devido a pequena área de interesse para teste também é outra grande fonte de incerteza.

Por outro lado, as soldas simuladas, ainda segundo Adonyi (2006), podem produzir uma única microestrutura homogênea em um material de maior volume e desta forma melhor testar as diferentes propriedades da ZAC para diferentes calores impostos. Entretanto, Spanos (1995) cita que nem sempre há equivalência entre as microestruturas previstas em publicações de curvas de transformação por resfriamento contínuo (CCT) feitas por simulação e o encontrado em campo. Isto, de acordo com o autor, é devido às particularidades de composição dos materiais, como por exemplo a distribuição de precipitados de carbonitretos de nióbio e a utilização de amostras homogêneas. Entretanto, as soldagens reais trazem uma maior variabilidade.

Os métodos mais comuns de simulação para estudos de soldabilidade dos aços (simulação térmica por Gleeble e dilatômetro) são informatizados e, sob circunstâncias normais, operam com grande exatidão e reprodutibilidade. Esses métodos são aplicados na confecção de curvas de transformação por resfriamento contínuo, mais comumente referenciadas pela sigla inglesa CCT (“continuous cooling transformation”), das diversas regiões da ZAC. Essas curvas correlacionam um ciclo térmico (temperatura x tempo) imposto em uma amostra de forma a simular suas mudanças microestruturais. Estas alterações são mensuradas, por exemplo, através de transdutores de deslocamento que podem medir com precisão qualquer mudança de comprimento da amostra causada pelos diferentes tipos de estrutura cristalina que ocorrem no estado sólido do aço (dilatação e retração). Outra forma é a modificação da curva de resfriamento devido ao calor latente das reações de transformação metalúrgicas.

Adonyi (2006) ressalta que uma questão fundamental é a correlação entre as microestruturas e propriedades simuladas com os resultados reais, sendo responsável por cerca de 70 a 80 % do tempo consumido nestes projetos. Porém, uma vez encontrada esta correlação, o processo se torna confiável, fácil de usar, com boa repetitividade e eficiente em termos de custo. Assim, a tentativa de aplicação direta de uma curva CCT ao processo de soldagem precisa ser cautelosa e comparada com soldas reais. Entretanto, estas simulações ainda são complementares a outros testes de soldabilidade, como por exemplo ensaio Tekken (ou Y-groove conforme norma JIS Z 3158) e medição de dureza máxima (conforme norma JIS Z 3101). Isto para trazerem a vista condições mais próximas das soldagens reais do que as realizadas nos testes padrão. Mas mesmo reconhecido o valor das simulações de soldagens, não é popular o uso delas como suporte para elaboração de procedimentos de soldagem (EPS).

Desta forma, este trabalho teve como objetivo geral o desenvolvimento e avaliação de uma metodologia para, experimentalmente, orientar a elaboração e o controle da aplicação de procedimentos de soldagem de aços estruturais através de atlas microestruturais de regiões da zona afetada pelo calor (ZAC) de um dado aço. Tanto na elaboração quanto na aplicação, a ideia foi comparar a microestrutura resultante da aplicação de um procedimento (em elaboração ou já qualificado) em soldas reais com as microestruturas caracterizadas (metalograficamente e mecanicamente – tração, dureza e charpy entalhe em V) do atlas do aço em questão. Assim, poder-se-ia dizer se os parâmetros de soldagem da EPS realmente levariam às propriedades desejadas, independentemente do processo de soldagem ou outras variáveis operacionais. Ou seja, se almejou uma forma muito mais segura, precisa e menos conservativa do que como se faz em geral, baseando em faixas de calor imposto especificadas de forma arbitrária.

Porém, foi preciso ainda definir como estes atlas poderão ser construídos. Onsøien et al. (2009) descreve em seu trabalho um diagrama CCT para a ZAC de um aço de aplicação offshore X70 que até então apenas tinha comparativo à um outro trabalho de Hulka et al. (1990) em aço X70, com composição química diferente. Esta mesma metodologia também foi utilizada por Alberly e Jones (1977) para um aço 0.5Cr-Mo-V. Nestes trabalhos, verificou-se que a utilização de dilatometria associada à caracterização metalográfica pode estabelecer um atlas válido para a zona afetada pelo calor dos aços. Estes atlas puderam correlacionar soldas reais com microestruturas com susceptibilidade à trinca. Porém, não puderam prever falhas, uma vez que as falhas dependem da intensidade das restrições durante a soldagem e o nível de impurezas em um determinado aço.

Assim, como objetivo específico do presente trabalho, foi inicialmente avaliado e validado a possibilidade de elaboração de atlas de microestruturas através da construção de

CCT por simulação física de uma região da zona afetada pelo calor (ZAC) e da caracterização metalográfica e mecânica das regiões simuladas. A aplicação desta metodologia foi realizada em um aço de baixa liga e alta resistência produzido por laminação controlada de classe de resistência de 65 ksi (ASTM A572 Grau 65).

Pretendeu-se ainda, como outro objetivo específico, procurar uma forma de estabelecer e quantificar os benefícios econômicos gerados em um projeto industrial conduzido sob a óptica do uso desta metodologia para otimizar os procedimentos de soldagem (EPS) existentes.



## CAPÍTULO II

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 Aços estruturais

Com o advento da laminação controlada, a criação de rotas de fabricação de aços cada vez mais resistentes têm sido criadas. Conforme descrito por Barbosa (2013), existem basicamente os mecanismos de aumento de resistência por precipitação, por solução sólida ou refino de grãos. A aplicação dos conceitos desses mecanismos tem evoluído ao longo das últimas décadas, resultando em aços cada vez mais resistentes, porém com diferentes comportamentos em termos de tenacidade. A Figura 2.1 demonstra esta evolução:

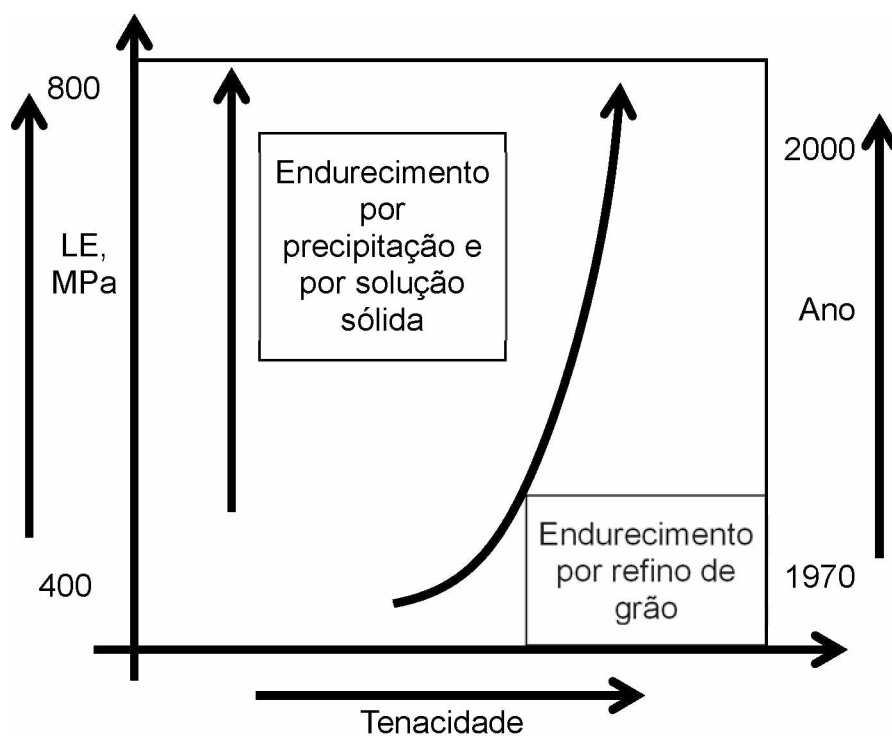


Figura 2.1 – Evolução dos aços ao longo dos anos com diferentes mecanismos de aumento de resistência e sua influência na tenacidade (BARBOSA, 2013)

Em linha com o descrito por Barbosa, os fabricantes de aços passaram a utilizar uma combinação de mecanismos de aumento de resistência como forma de alcançar e atender requisitos de maior resistência mecânica. Um exemplo descrito por Hino et al. (1990, apud OUCHI, 2001) seriam os tubos de gás e óleo, entre os anos 70 e 80, que usavam largamente o aço API grau X-70. A primeira linha utilizando aços API grau X-80 se deu em 1990 nos Estados Unidos, sendo seguido por uma nova linha em 1992 na Alemanha. Atualmente, ainda segundo Ouchi (2001), existem estudos de linhas até mesmo com grau X-100. A tendência das últimas décadas neste setor foi a busca pela redução de custos na construção e operação das linhas, além de requisitos de resistência a corrosão devido a exploração marítima em profundidade e atmosferas com gases mais corrosivos. A redução dos custos operacionais foi possível pelo uso de materiais de alta resistência e otimização no design das tubulações que permitiram maior durabilidade, facilidade de manutenção, segurança e uso de pressões maiores na operação de transporte dos gases que permitem um maior fluxo de gás. Estes fatores também são importantes nos custos de investimento destes projetos.

Ouchi (2001) descreve ainda a tendência na construção civil, no Japão e no mundo, do aumento da altura máxima de estruturas, redução de custos de materiais e construção, mantendo-se as condições de segurança e confiabilidade contra abalos sísmicos. Exemplifica ainda que no Japão os prédios em 1965 não chegavam a 50 metros de altura. Mas em 1967 foi construído um primeiro prédio com 147 m (Kasumigaseki), com crescimento gradativo das alturas das edificações até em 1994, quando foi apresentado a Yokohama Land Mark Tower, com 296 metros de altura. No mundo, a KLCC Twin Tower de 452 metros é citada como concluída em 2000. As pontes também apresentaram a mesma tendência, sendo o maior vão central no Japão na década de 60 de 367 metros (ponte Wakato) muito inferior aos 1990 metros (ponte Akashi) finalizada no fim dos anos 90. Para tal, os aços TMCP foram essenciais por permitirem aumentar, em comparação aos aços TMCP convencionais, a sua resistência à tração a valores maiores que 590 MPa com chapas de até 100 mm de espessura, melhorar a tenacidade e soldabilidade, aperfeiçoar a relação de escoamento-ruptura e apresentar resistência ao fogo a temperaturas de até 600°C. Scotti et al. (2014) complementa que estes aços estruturais têm características únicas obtidas com rígido controle termomecânico para produção de microestrutura fina e adição de baixíssimos níveis de elementos de liga

Jansto (2011a) complementa a visão de Ouchi ao declarar que, os aços BLAR são a solução para estruturas mais leves (lean design) no século XXI, que, devido às suas características de alta resistência à tração, tenacidade e boa soldabilidade, permitem reduzir as emissões de gases de efeito estufa, economizar energia e reduzir os custos de construções. Descreve ainda, que o uso destes aços em locais com temperaturas muito

baixas (abaixo de  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) poderão ser mais econômicas, por permitir a substituição de aços ligados ao níquel sem riscos de fraturas frágeis devido a temperatura.

Scotti et al. (2014), entretanto, alertam que aços estruturais com tratamento termomecânico apresentam algumas restrições e, por isso, existe a necessidade do estudo do seu comportamento durante os ciclos térmicos de soldagem.

## **2.2 Influências da composição em características do aço estrutural**

No setor estrutural, Ouchi (2001) descreve o uso disseminado dos aços de baixa liga e alta resistência em navios, construções civis, prédios e veículos de transporte. Isto se deve a soldabilidade superior e trabalhabilidade a frio desses aços quando comparados aos aços carbono convencionais. Os aços TMCP (Thermomechanical Control Process), a forma mais moderna de produção dos aços de baixa liga e alta resistência, praticamente tomaram este mercado devido as suas várias vantagens, dentre as quais se cita o decréscimo de teor de carbono ou teor de carbono equivalente, melhoria na tenacidade à baixa temperatura, redução de custos de fabricação e tempo de entrega dos aços. Especialmente em aços de aplicação offshore, os requisitos se tornaram severos, particularmente em termos de valor de energia absorvida Charpy e CTOD (Crack Tip Opening Displacement) à baixa temperatura no metal de base e na ZAC. A otimização de parâmetros TMCP durante a produção de chapas grossas e o efetivo uso de alguns elementos microligantes para o refino da microestrutura da ZAC em soldagens com alto calor imposto foram medidas tomadas para atender estes requisitos.

Barbaro et al. (2013) confirma que o controle das propriedades da ZAC pode ser realizado através do controle químico da composição do aço. Sendo que uma relação estequiométrica entre titânio e nitrogênio (Ti/N) provê uma boa homogeneidade e uma grande quantidade de precipitados de nitretos de titânio (TiN) de pequena dimensão, a condição ótima para o efeito de “pinning” que evita o crescimento do grão austenítico. Cita ainda que teores de nióbio entre 0,08% a 0,11% habilitam a capacidade completa deste elemento para:

- Refinamento de grão;
- Redução da temperatura de transformação entre austenita-ferrita;
- Endurecimento por precipitação;
- Retardamento da recristalização da austenita.

Barbaro et al. (2013) cita também que nos aços microligados ao nióbio e titânio existem precipitados complexos de (Ti,Nb)(C,N), alguns com núcleos ricos em titânio e camadas externas ricas em nióbio e outros como precipitados isolados. Mesmo sendo conhecido que os precipitados de nióbio nesses aços dissolvem-se a temperaturas mais baixas do que os

TiN, percebe-se um melhor controle do crescimento dos grãos austeníticos à 1350 °C nos aços com alto teor de Nb. Os mecanismos para tal podem estar relacionados, mas não limitado, a:

- Efeito de dragagem do Nb em solução sólida, provindo da dissolução de NbC e NbCN;
- Existência de camadas ricas de Nb em torno de TiN, evitando o crescimento dos precipitados de titânio;
- Segregação de Nb nos contornos dos grãos austeníticos e/ou redução de energia no contorno, o que pode retardar o crescimento do grão.

Ainda, na descrição de Barbaro et al. (2013), o molibdênio também tem efeitos benéficos, mas que ainda não foram completamente mensurados ou estudados.

Stalheim & Muralidharan (2006) demonstram em seu trabalho de simulação de diferentes curvas CCT (ou TTT contínuo) que os diferentes elementos afetam as transformações de fase de maneira diferente nos aços para tubulações de petróleo e gás. Como exemplo, um aumento do teor de carbono move o campo ferrítico, perlítico e bainítico para a direita (aumentando o tempo necessário para a transformação) permitindo a formação da fase martensítica. Já a adição de elementos como molibdênio, níquel e nióbio reduzem a cinética de formação da ferrita e perlita permitindo desta forma uma maior formação de bainita. Cada elemento afeta o diagrama CCT diferentemente, seja na natureza ou na magnitude.

### 2.3 Aços bainíticos

Dentro os diversos métodos para aumento da resistência mecânica de forma a atingir valores superiores a 50 ksi, destaca-se o uso do resfriamento acelerado após a conformação a quente. No mercado nacional, o único fabricante para este tipo de aço é a empresa USIMINAS, que o faz pelo processo conhecido como “Sincron” (anexo II). Este aço BLAR produzido por TMCP é de estrutura bainítica, gerado pelo resfriamento acelerado após a conformação.

Bhadeshia (1989) descreve que os aços bainíticos apresentam melhores propriedades mecânicas ao se comparar aos aços martensíticos, desde que o teor de carbono seja reduzido para aproximadamente 0,1%(em peso) e que seja realizada adição de elementos de liga. Caso isto não ocorra, o crescimento de partículas de cementita e regiões relativamente largas de martensita não temperada (obtidas através da transformação incompleta da bainita) tem um efeito muito prejudicial na tenacidade do aço, impedindo o seu uso em certas aplicações.

Bhadeshia (1989), explica ainda que nestes aços bainíticos a alta concentração substitucional de elementos de liga, principalmente o manganês e o silício, pode ser prejudicial na resistência mecânica por limitar os graus de transformação da bainita. Caso as adições destes elementos sejam muito baixas, também poderá ocorrer a redução da dureza do aço tornando a produção da microestrutura bainítica difícil. Desta forma, o equilíbrio é de suma importância para a formação adequada da microestrutura.

De forma mais detalhada, Bhadeshia (2015), descreve que o silício em altas concentração retarda a formação de cementita provinda da austenita em contraste com o manganês que facilmente precipita na forma de  $Mn_3C$ . Assim, um aço que seria formado por austenita+ferrita em determinada condição passa a ter um campo exclusivamente austenítico com a adição de silício. Esta condição é amplificada quando o aço possui baixa concentração de carbono, facilitando a formação de bainita em detrimento da martensita e ferrita.

A adição de elementos com grande potencial de formação de carbonitreto, como o nióbio, titânio e vanádio, permitirá, conforme descrito por Barbosa (2013), um aumento da resistência mecânica devido à redução do tamanho de grão, regida pela relação de Hall-Petch.

Desta forma, o equilíbrio de baixo carbono equivalente, quantidade de elementos de liga equilibrada e bom controle de processo é de fundamental importância para a obtenção das propriedades desejadas nestes aços.

## **2.4 Soldabilidade de Aços bainíticos**

Para entender a soldabilidade dos aços bainíticos, é importante entender quais os fatores que podem influenciar a soldagem dos aços de alta resistência. Kirkwood (2011) descreve que nos anos 70 as propriedades dos metais de base, em geral, haviam sido suficientemente compreendidas e não apresentavam problemas para a soldagem. Por isso, as atenções se voltaram ao estudo dos efeitos de elementos de liga na ZAC. Nesta época diversas especificações empíricas e pouco técnicas foram desenvolvidas, sem, entretanto, contribuir decisivamente para a compreensão dos fatores técnicos. Mesmos os atores (fabricantes de aços e de elementos de ferroligas) tinham pouca informação sistematicamente formatada. Apenas nos anos 80 foi realizado pela empresa CBMM uma primeira revisão completa sobre os efeitos do nióbio no controle da tenacidade da ZAC.

Conforme relatório da CBMM (1980, apud Kirkwood, 2011), a tenacidade da ZAC é afetada principalmente pela microestrutura, sendo a temperatura de transformação o fator mais importante neste contexto. A temperatura de transformação é, por sua vez, controlada pela inter-relação entre composição química e taxa de resfriamento nas temperaturas críticas

de transformação da austenita para outras microestruturas. O estudo demonstrou que toda a composição química (não apenas um único elemento) definirá a tenacidade.

Scotti et al. (2014), complementa que um dos aspectos mais importantes da soldabilidade dos aços são suas características metalúrgicas (tamanho de grão e microestrutura) da região de crescimento de grãos da zona afetada pelo calor (ZAC GG). A tenacidade da ZAC por sua vez, é dependente da dureza e formação de precipitados/microfases. O efeito destas relações complexas é governado pelo ciclo térmico presente na região de grãos grosseiros da ZAC.

Kirkwood (2011) descreve ainda que, devido as interações complexas entre os elementos de composição em um material, é difícil criar regras absolutas para o comportamento dos materiais com base exclusiva nos níveis de um ou outro elemento de liga. Existem casos onde o manganês e níquel, por exemplo, podem deteriorar propriedades mecânicas como tenacidade, enquanto o carbono a melhora, de forma completamente oposta ao que ocorre de maneira geral. Por isso é preciso entender como a transformação de temperatura foi alterada pela composição.

Dentre as regiões da solda a estudar, Kirkwood (2011) descreve que inicialmente os estudos se concentraram na região de grãos grosseiros da ZAC (ZAC GG), pois, em uma época de aços com alto carbono, esta era inevitavelmente a região que apresentava menor tenacidade e maior número de descontinuidades comuns de soldagem, como por exemplo, trincas induzidas por hidrogênio. Atualmente é necessário revisitar estes conceitos, tendo em vista a nova composição dos aços, para melhor entender os efeitos desta região e também para soldagens com múltiplos passes na região da ZAC GG reaquecida intercriticamente (IC da ZAC GG). A figura 2.2 de Kirkwood (2011) demonstra essas regiões.

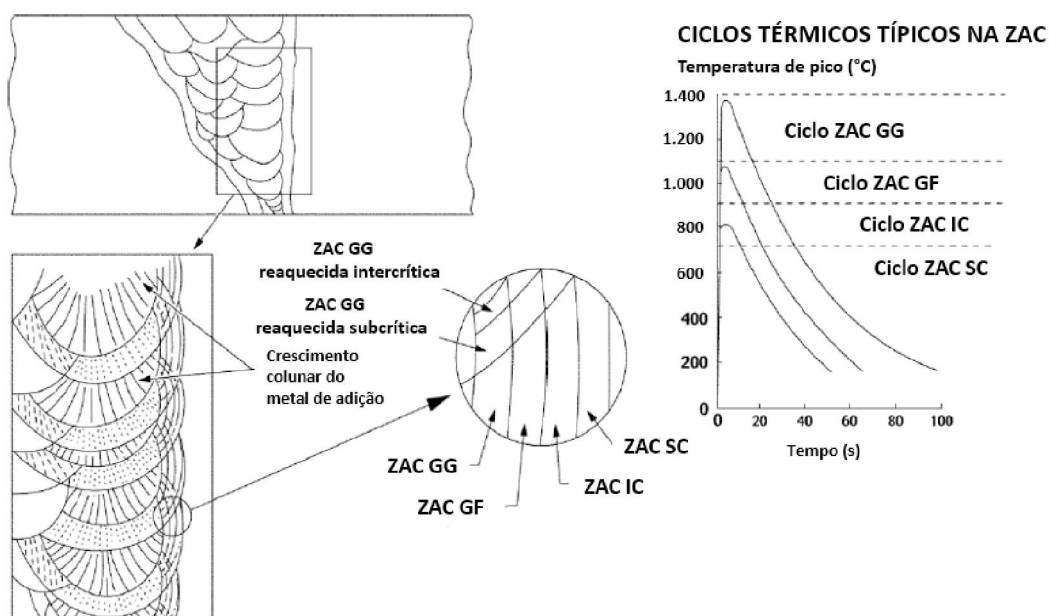


Figura 2.2 – Desenvolvimento de microestrutura em ZAC. Kirkwood (2011)

Com essas informações, pode-se melhor avaliar a consequência da soldagem sobre os aços BLAR, especificamente quanto aos aços bainíticos. Bhadeshia (1989) descreve que os aços de duas fases ferrita+bainita são descritos como os de melhor soldabilidade, especialmente quando microligados ao nióbio. A razão para esta melhora da soldabilidade não está clara, mas pode estar relacionada ao fato da bainita ter uma menor resistência mecânica quando comparada à martensita, sendo que uma perda de resistência na zona afetada pelo calor da solda tem menor consequência. Outro fator importante na ZAC dos aços TMCP é o tamanho efetivo do grão que afeta diretamente a fratura por clivagem.

Como descrito anteriormente no item 2.3, outro fator de importância na fabricação dos aços bainíticos é o controle dos níveis de carbono e elementos de liga para aumento de resistência por refino de grãos. Esta mudança permite uma redução no campo de transformação de martensita e amplia a formação de bainita ao alterar a cinética da transformação de estado sólido, devido à concentração de soluto mais baixa. Desta forma, este aço terá menor susceptibilidade à formação de microestruturas martensíticas ou perlíticas quando sujeitos a diferentes ciclos térmicos, característicos dos diferentes procedimentos de soldagem.

Ainda, conforme descrito por Prasad (2008), a soldagem de seções de grande espessura em aços impõe grandes problemas como, por exemplo, distorção, tensão residual, amaciamento ou endurecimento da ZAC (devido as dilatações ocorridas durante o ciclo térmico). Aços de maior resistência à tração permitem, desta forma, a adoção de espessuras menores, que sofrerão menor impacto térmico, tornando em conjunto com os baixos teores de carbono a soldagem dos aços bainíticos ainda mais simples.

## **2.5 Soldagem de aços bainíticos segundo a norma AWS D1.1**

Apesar da evolução no processo de fabricação e a otimização das composições para a obtenção de características ideais nos aços bainíticos, as normas de especificação de aços, como por exemplo a norma ASTM A572, mantêm a possibilidade de fabricação dos aços com teores de carbono muito elevados não compatíveis ao processo de laminação controlada e resfriamento acelerado modernos.

Um exemplo são os aços classificados como grau 65 da norma ASTM A572 (2013), que atualmente são fabricados por processos de resfriamento acelerado que darão origem a estruturas bainíticas, com concentração percentual em massa de carbono máximo de 0,1 conforme citado no item 2.3. Entretanto, a norma ASTM considera como especificação para

os aços desta mesma classe teores de carbono máximo de 0,26 % para chapas menores que 13mm, e 0,23 %, para chapas entre 13 e 32 mm.

Devido aos altos valores de carbono especificados nas normas de aço, as normas que especificam juntas pré-qualificadas em aços estruturais, AWS D1.1 (2010), demandam exigências potencialmente desnecessárias, como, por exemplo, valores elevados de pré-aquecimento (com consequência sobre o custo de fabricação e imprevisibilidade sobre as propriedades mecânicas).

A tabela 2.1 traz o comparativo da especificação de pré-aquecimento de soldagem para o aço ASTM A572 grau 50 (BLAR) e 65 (BLAR bainítico) em juntas pré-qualificadas conforme norma AWS D1.1. Esta tabela, apesar de ser a mais utilizada na elaboração de procedimentos de soldagem, não contempla o uso adequado do potencial de carbono reduzido nos aços bainíticos, gerando necessidades de pré-aquecimento desnecessários nos aços modernos.

Tabela 2.1 – Temperatura de pré-aquecimento e interpasse pré-qualificado (AWS D1.1, 2010)

<b>Categoria</b>	<b>Especificação do aço</b>	<b>Processos</b>	<b>t (mm)</b>	<b>T mín (°C)</b>
<b>B</b>	ASTM A 572 Grau 50	SMAW (eletrodo baixo hidrogênio), SAW, GMAW, FCAW	3 < t ≤ 20	0
			20 < t ≤ 38	10
			38 < t ≤ 65	65
			t > 65	110
<b>C</b>	ASTM A 572 Grau 65	SMAW (eletrodo baixo hidrogênio), SAW, GMAW, FCAW	3 < t ≤ 20	10
			20 < t ≤ 38	65
			38 < t ≤ 65	110
			t > 65	150

Entretanto, a norma AWS D1.1 (2010) traz em seu Anexo I – Guia para métodos alternativos de determinação de pré-aquecimento, uma forma de avaliação mais particular quanto à susceptibilidade a trincas por endurecimento ou induzidas por hidrogênio, com base na real composição química do material. Para tal, em primeiro lugar é necessário identificar em qual zona do diagrama de Graville (Figura 2.3) o aço em questão está localizado, correlacionando o teor de carbono com o carbono equivalente (CE) calculado através da equação 1.

$$CE = C + \frac{(Mn+Si)}{6} + \frac{(Cr+Mo+V)}{5} + \frac{(Ni+Cu)}{15} \quad (1)$$



Estando o aço na Zona I a ocorrência de trincas não é esperada, podendo ocorrer apenas quando houver alta restrição e alto nível de hidrogênio, sendo por isso o método de controle de hidrogênio utilizado para o cálculo do pré-aquecimento (o nível de controle de contaminação de hidrogênio nos consumíveis e durante a soldagem é o fator essencial). Para a Zona II o método de controle de dureza é o mais indicado, com avaliação e manutenção de valores de dureza abaixo de 400 HV ou 350 HV para aços ligados (a dureza final da ZAC é o fator crítico de aparecimento de trincas). No caso dos aços modernos esta zona não será atingida devido aos teores de carbono sempre inferiores a 0,10%. Na Zona III deverá também ser utilizado o método de controle de hidrogênio.

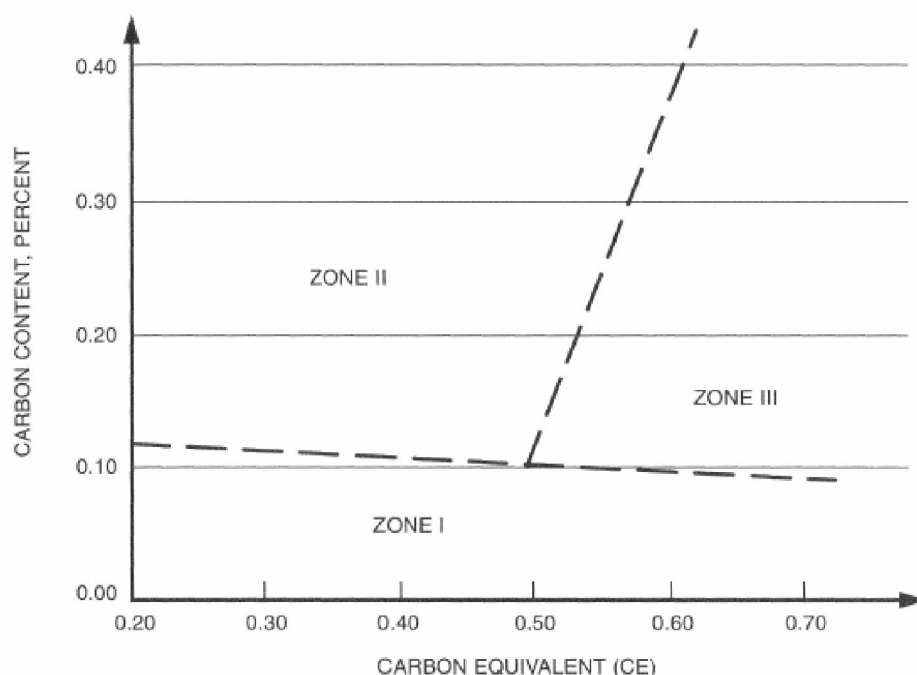


Figura 2.3 – Diagrama de Graville (Anexo I AWS D1.1, 2010)

No caso do ASTM A572 Grau 65 em questão, com baixo carbono (0,1%) e resfriamento acelerado, a Zona I é a de maior probabilidade, sendo o controle de hidrogênio, o método aplicável. Para este método, é necessário inicialmente se encontrar o parâmetro crítico do metal em trincas de solda ( $P_{cm}$ ), calculado conforme equação 2, e o índice de susceptibilidade, calculado conforme equação 3.

$$1. \quad P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (2)$$

$$2. \quad \text{Índice de Susceptibilidade} = 12P_{cm} + \log_{10} H \quad (3)$$

*Nota: Os valores de H utilizados na equação 3 são dados conforme tabela 2.2.*

Em adição ao índice de susceptibilidade calculado pela equação 3, é necessário estabelecer o nível de restrição do material, no momento de realização da soldagem, de forma a determinar o potencial de acúmulo de tensão na solda. Assim, o mesmo também é classificado em três níveis conforme tabela 2.3.

Com os resultados de Índice de Susceptibilidade e Nível de Restrição, a tabela do anexo I da norma AWS D1.1 deverá ser consultada de forma a estabelecer a necessidade de pré-aquecimento para diferentes espessuras de chapa.

Tabela 2.2 – Valores de H conforme Anexo I (AWS D1.1, 2010)

Classe	Descrição	Processos	Valor
H1	Extra baixo Hidrogênio	(a) Eletrodos revestidos com baixo hidrogênio retirados de embalagens hermeticamente fechadas, secado por uma hora entre 370-430°C e utilizados em intervalo de até 2 horas após a retirada.  (b) GMAW com arames maciço limpos.	5
H2	Baixo Hidrogênio	(c) Eletrodos revestidos com baixo hidrogênio retirados de embalagens hermeticamente fechadas ou acondicionados conforme norma e utilizados em intervalo de até 4 horas após a retirada.  (d) SAW com fluxo seco.	10
H3	Hidrogênio não controlado	Todos os demais consumíveis não atendidos para H1 e H2	30

Tabela 2.3 – Classificação de restrições conforme Anexo I (AWS D1.1, 2010)

Classe	Descrição	Processos
1	Baixa restrição	Juntas comuns de filete ou de topo onde uma liberdade de movimento razoável entre as partes existe.
2	Média restrição	Juntas de filete ou de topo onde devido a partes já estarem conectadas a estrutura, existe uma redução na liberdade de movimento.
3	Alta restrição	Este nível descreve juntas com quase nenhuma liberdade de movimento das partes, como por exemplo juntas de reparo, especialmente em materiais espessos.

Em relação à utilização de consumíveis para a soldagem dos diferentes aços, nenhuma observação quanto a não adequação foi realizada. Sendo realizado em todos os casos o processo de *matching* entre o metal de base e os consumíveis de solda. Na tabela 2.4 é descrito a combinação destes materiais para as especificações ASTM A572 grau 50 (BLAR) e grau 65 (BLAR bainítico).

Tabela 2.4 – Combinação de metal de base e de adição pré-qualificado (AWS D1.1, 2010)

Grupo	Especificação do aço	Processo	Eletrodo	
			AWS	Classificação
II	ASTM A 572 Grau 50	SAW	A5.17	F7XX-E, F7XX-EC
			A5.23	F7XX-E, F7XX-EC
II	ASTM A 572 Grau 50	FCAW	A5.20	E7XT
			A5.29	E7XTX
III	ASTM A 572 Grau 65	SAW	A5.23	F8XX-E, F8XX-EC
III	ASTM A 572 Grau 65	FCAW	A5.29	E8XTX

## 2.6 Identificação das microestruturas na ZAC

Para a previsão das microestruturas geradas a partir da soldagem dos aços com microestrutura inicial bainítica, é importante compreender quais são os efeitos da temperatura nos diferentes microconstituintes existentes e como ela afetará o potencial de formação de outras microestruturas.

Conforme descrito por Yang e Bhadeshia (1988), a reaustenitização da bainita ocorre de maneira um pouco diferente da de outras microestruturas, como ferrita e martensita. Ocorre

que na bainita a difusão de carbono ocorre a alta temperatura, para que a mesma possa retornar ao estado austenítico completo (necessário a mobilidade do carbono se difundindo nos grãos austeníticos). Este processo é diferente da memória de forma que está presente na martensita, que iniciará a formação de austenita com adições menores de temperatura e com cinética mais acelerada por não depender tão fortemente desta mobilidade do carbono. Assim, apenas com temperaturas de pico elevadas (acima de  $A_{c3}$ ) ocorrerá nos aços bainíticos uma completa mudança da microestrutura. Entre temperaturas  $A_{c1}$  e  $A_{c3}$  ocorrerá apenas parcialmente a reaustenitização da bainita, sem permitir o crescimento do grão. Desta forma, haverá menor mudança estrutural na zona afetada pelo calor, especialmente nas soldas de múltiplos passes.

Outra variável de bastante importância para a compreensão da transformação, será o tempo de permanência acima da temperatura  $A_{c3}$ , que está diretamente relacionado ao crescimento do grão austenítico. Caso ocorra este crescimento, o potencial de formação de bainita é reduzido pela diminuição do número de contornos de grão, nucleadores da bainita superior.

A formação de martensita e a consequência desta microestrutura para as características mecânicas do aço estarão associadas ao teor de carbono e ao tempo para difusão deste elemento. Conforme descrito por Suzuki, Rees e Bhadeshia (1993), a ocorrência de regiões frágeis localmente ocorrerá em regiões martensíticas apenas quando a concentração local de carbono for elevada. Os autores explicam que antes da transformação em martensita a austenita é enriquecida por carbono devido a formação de outras formas de ferrita, sendo esta uma condição necessária para a formação de uma região frágil, pois em outra situação não haverá concentração suficiente de carbono para tornar a martensita frágil.

Assim, Suzuki, Rees e Bhadeshia (1993) concluem que a ocorrência de ciclos térmicos de altíssima velocidade contribui com a formação de martensita, porém, em uma forma não frágil devido à falta de tempo de difusão do carbono e baixo carbono local. Velocidades de resfriamento moderadas poderão ter efeitos mais deletérios para as propriedades mecânicas do aço devido a formação de pequenas ilhas martensíticas de alta dureza, nucleadoras de defeitos.

Outra variável de importância citada por Suzuki, Rees e Bhadeshia (1993) foi o tamanho do grão austenítico, que permitirá, em caso de menor dimensão deste grão, uma maior ocorrência de formação de ferrita alotriomorfa antes da formação da martensita. Neste caso, o teor de carbono no aço será o principal motor desta transformação. Em aços de baixo teor de carbono, a quantidade de martensita tende a ser pequena devido à cinética mais favorável a formação de Bainita e ferrita de Widmanstätten nucleados a partir de precipitados e do contorno de grão (a ferrita alotriomorfa tenderá a ter seu crescimento a partir dos

contornos de grãos austeníticos até que a condição para que uma destas duas formas ocorra). Somente se não houver condições para a formação de uma destas duas formas é que ocorrerá a formação martensítica. Em caso de resfriamento muito lento, a cinética dará possibilidade para a formação de perlita a partir da ferrita alotriomorfa. Devido à baixa quantidade de elementos de liga nos aços bainíticos, a existência de precipitados que poderiam dar início a ferritas nucleadas a partir dos mesmos como a Acicular ou a de Widmanstätten serão de menor ocorrência.

Conforme descrito por Scotti et al. (2014), as terminologias de microconstituintes não são universalmente adotadas por diferentes pesquisadores, havendo classificações diferenciadas para microestruturas potencialmente similares. Assim, a classificação dos constituintes da ZAC não é harmonizada. Devido a simplificação esperada nas microestruturas do aço ARBL produzido por resfriamento acelerado, neste trabalho será realizada a identificação das microestruturas de forma macro, como Martensita (M), Bainita (B), Perlita (P) e Ferrita (F), preferencialmente a outras classificações detalhadas devido a não harmonização das mesmas.

## 2.7 Simulação física da ZAC

Stalheim & Muralidharan (2006) explicam que as curvas CCT descrevem a extensão das transformações de fase como função do tempo em um decréscimo contínuo de temperatura. As linhas do diagrama descrevem o início e fim da mudança de uma microestrutura em particular.

Stalheim & Muralidharan (2006) descrevem ainda que a indústria de óleo e gás vem ao longo dos últimos anos necessitando alcançar requisitos de resistência à tração e tenacidade cada vez mais elevados. As curvas CCT tem sido utilizada neste contexto como forma de selecionar composições e rotas de processo apropriadas, de forma a obter uma microestrutura específica desejável de maneira também efetiva em custos. As propriedades mecânicas do aço são função das frações volumétricas das fases na microestrutura e sua respectiva morfologia.

Stalheim & Muralidharan (2006), descrevem que os diagramas CCT no passado somente podiam ser desenvolvidos em condições laboratoriais que requerem um extenso tempo e esforço técnico. Entretanto atualmente, devido a vasta quantidade de informação disponível e a melhoria das ferramentas computacionais é possível gerar curvas CCT através de softwares com razoável precisão e de maneira bastante rápida, tornando seu uso bastante mais comum e sendo recomendado como parte das avaliações no design de aços para aplicação em tubulações de petróleo e gás.

Para Scotti et al. (2014), as simulações térmicas têm sido amplamente utilizadas para a avaliação da zona afetada pelo calor. Entretanto, esses autores descrevem que nas simulações laboratoriais parâmetros-chaves vêm sendo adotado de forma diferente pela falta de literatura comparativa ou por resultados disponibilizados pelos autores de forma incompleta. Outro motivo para a adaptação de metodologia é a limitações de equipamentos. A tabela 2.8 demonstra alguns exemplos comparativos de tais diferenças.

Tabela 2.8 – Comparação entre métodos de simulação térmica (Scotti et al., 2014)

<b>Equipamento</b>	<b>Taxa de Aquecimento (°C/s)</b>	<b>Temperatura de pico (°C)</b>	<b>Tempo na temperatura de pico (s)</b>	<b>Fonte (referências em Scotti et al., 2014)</b>
Gleeble/ Dilatômetro	500	1000 a 1350	1	Bayraktar & Kaplan
Gleeble	100	1300	1	Caron et al.
Dilatômetro	50	1350	5	Kuzmikova et al.
Gleeble	500	1350	1	Lane et al.
Gleeble	Não disponível	1350	1	Liou et al.
Dilatômetro	30	1150 a 1250	Não disponível	Loureiro & Fernandes
Dilatômetro	40	950 a 1250	30	Miranda & Fortes
Dilatômetro	150	1200	Não disponível	Onsøien et al.
Smitweld	150	975	0,5	Samardžić et al.
Gleeble	433	1300	2	Shi & Han
Gleeble	200	1000 a 1400	0,15	Shome & Mohanty
Dilatômetro	100	1400	Não disponível	Spanos et al.
Gleeble	400	1350	0,5	Zheng et al.

Assim, se torna importante a criação de uma metodologia de simulação física que possa ser realizada, com boa reprodutibilidade, de forma a validar um modelo físico que poderá posteriormente ser utilizado como calibrador de simuladores digitais na otimização de procedimentos de soldagem. A simulação, entretanto, deverá ser utilizada como ferramenta orientativa por não permitir a simulação completa das variáveis como chanfro, espessura, número de passes que moldam a transferência de calor na peça, entre outros fatores importantes para a definição final do procedimento de soldagem.

## CAPÍTULO III

### METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Metodologia Geral

O objetivo principal deste trabalho é demonstrar que a geração de diagramas CCT é uma ferramenta importante para auxiliar os engenheiros de soldagem na confecção e controle de EPS. Desta forma, a metodologia geral deste trabalho é baseada na geração de um atlas com as correlações entre a curva de resfriamento imposta a um material (no caso em estudo foi utilizado o aço ASTM A572 Grau 65, sendo caracterizada apenas a região de grãos grosseiros) por soldagem de passe único e as modificações metalúrgicas e respectivas propriedades mecânicas. Assim, o primeiro passo foi obter diferentes amostras do aço com a imposição de uma grande faixa de ciclos térmicos de soldagem. Isto poderia ser feito por soldagens reais, mas, além de ser uma prática demorada e cara, pode também se tornar imprecisa sem perceber, devido às dificuldades de se medir ciclo térmicos nas regiões desejadas. Assim, a proposta foi fazer simulações físicas. As duas técnicas mais conhecidas para tal são a dilatométrica de alta velocidade e o aquecimento/resfriamento controlado (por exemplo, utilizando-se a Gleeble). Neste trabalho optou-se por usar as duas técnicas, para fins comparativos e complementares.

Uma vez tendo as regiões do material sob a ação de uma faixa ampla de ciclos térmicos, este material foi caracterizado metalograficamente e mecanicamente. A caracterização metalográfica foi baseada principalmente em microscopia óptica, gerando o atlas de microestrutura da ZAC grosseira para diferentes velocidades de resfriamento. A caracterização mecânica foi feita tanto pela dureza quanto pela resistência à tração e tenacidade, essa última medida em Ensaio Charpy entalhe em V. Sobre o atlas com suas microestruturas e propriedades mecânicas caracterizadas, foi delimitado a região em que se espera que todo processo e parâmetros produzam soldas similares.

Ainda do ponto de vista metodológico, foram comparadas as microestruturas resultantes de soldas reais com as do atlas. No caso avaliado, será usado nas soldagens reais os mesmos parâmetros de uma EPS qualificada. Com esta comparação será verificado, por exemplo, se pré-aquecimento seria necessário para este material ou se outra faixa de parâmetros de soldagem poderia ser utilizada para otimizar as propriedades da solda.

Finalmente, uma avaliação econômica da aplicação da metodologia foi implementada visando viabilizar esta abordagem no meio industrial.

### 3.1.1 Especificação do aço a ser estudado

O aço ASTM A572 Grau 50 vem sendo utilizado de forma padrão pela empresa CODEME e outras empresas de construção metálica para o projeto de prédios industriais, tanto na forma de perfil laminado quanto soldado. Este aço apresenta um ganho de resistência considerável ao se comparar com os aços carbono comuns A36 ou SAE 1020 utilizados até poucos anos.

Entretanto, para o novo conceito de projeto estrutural na empresa CBMM referente ao prédio de uma unidade de secagem de concentrado refinado de nióbio (anexo I), foi selecionado o aço BLAR de especificação ASTM A570 Grau 65 que apresenta maior resistência mecânica quando comparado ao Grau 50. A adoção do Grau 65 trata-se de uma inovação para aplicações em prédios industriais no Brasil, tendo como contratempo a não existência no mercado nacional de perfil laminado deste material. Desta forma, todos os perfis deste aço utilizados no projeto serão soldados.

As especificações destes aços, conforme norma ASTM A572/A572M - 2013, para fins comparativos estão descritas nas tabelas 3.1, 3.2 e 3.3.

Tabela 3.1 – Requisitos de resistência nominal a tração para aços ASTM A572/A572M - 13

Grau	Limite de Escoamento (Mínimo)	Limite de Resistência à tração (Mínimo)	Alongamento (% mín.)	
			200 mm	50 mm
50	345 MPa / 50 ksi	450 MPa / 65 ksi	18	21
65	450 MPa / 65 ksi	550 MPa / 80 ksi	15	17



Tabela 3.2 – Composição química nominal básica dos aços ASTM A572/A572M - 13

Grau	t (mm)	Carbono (% máx)	Manganês (% máx)	Fósforo (% máx)	Enxofre (% máx)	Silício (% máx)
50	≤ 100	0,23	1,35 <sup>A</sup>	0,04	0,05	0,40
65	13 a 32	0,23	1,65	0,04	0,05	0,40
65	≤ 13 <sup>B</sup>	0,26	1,35	0,04	0,05	0,40

<sup>A</sup> Para cada 0,01% reduzido de C um acréscimo de 0,06% de Mn é permitido até o limite de 1,60%

<sup>B</sup> Uma composição alternativa com máximo de 0,21% de C e 1,65% de Mn é permitida.

Tabela 3.3 – Faixa nominal de elementos de ligas dos aços ASTM A572/A572M - 13

Tipo <sup>A</sup>	Elementos	Faixa (%)
1	Nióbio	0,005 – 0,05
2	Vanádio	0,01 – 0,15
3	Nióbio	0,005 – 0,05
	Vanádio	0,01 – 0,15
	Nióbio + Vanádio	0,02 – 0,15
5	Titânio	0,006 – 0,04
	Nitrogênio	0,003 – 0,015
	Vanádio	0,06 máximo

<sup>A</sup> O material deve estar de acordo com um dos tipos listados

### 3.2 Técnicas Experimentais

A etapa experimental deste trabalho foi dividida conforme a técnica aplicada para encontrar resultados mensuráveis, a saber:

- Simulação de ciclos térmicos em dilatômetro em amostras do aço;
- Simulação de ciclos térmicos em Gleeble em amostras do aço;
- Caracterização dos microconstituintes e dureza nas amostras que sofreram simulação;
- Ensaios mecânicos;
- Comparação de resultados experimentais com resultados de soldas reais.

### 3.2.1 Simulação de ciclos térmicos em dilatômetro

A investigação do comportamento de transformações de fases através de diagrama CCT de simulação de soldagem foi realizado utilizando um dilatômetro DIL805A/D da Universidade de Aachen, na Alemanha. A Figura 3.1 esquematiza o equipamento utilizado nesta simulação. O procedimento laboratorial para a execução das curvas foi o Stahl-Eisen-Prüfblatt SEP 1680 e SEP 1681, procedimento padrão do laboratório de simulações.

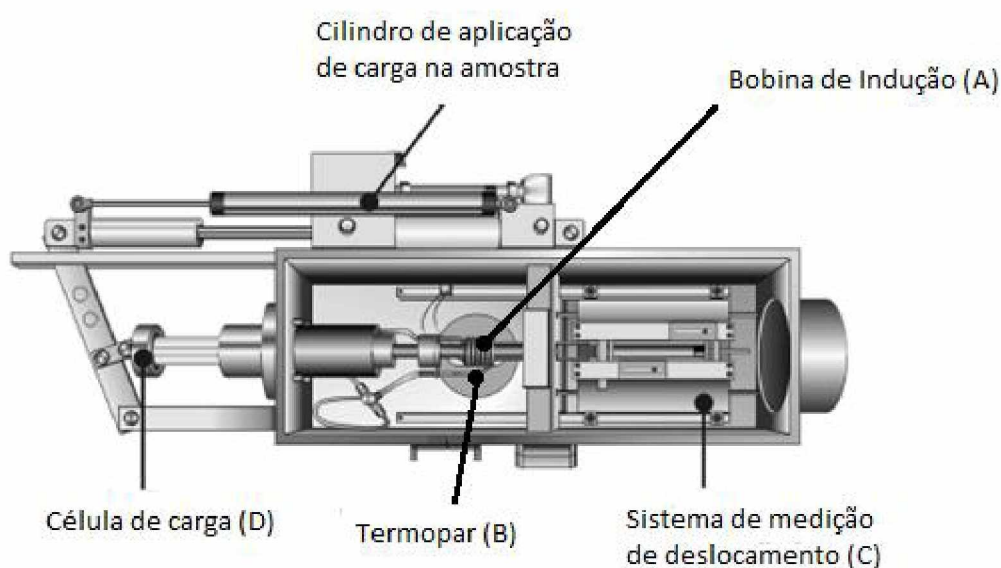


Figura 3.1 – Representação esquemática do dilatômetro DIL805A/D utilizado para a realização das simulações térmicas

As amostras do aço foram preparadas com dimensão de fitas com 7 mm de comprimento, 4 mm de largura e 1,3 mm de espessura através de corte e usinagem a baixa velocidade no sentido da laminação e centro da chapa para não provocar encruamento do material. Conforme ilustrado na Figura 3.1, as amostras foram posicionadas no interior e aquecidas através de bobina de indução (A) e posteriormente resfriados por gás inerte (hélio ou argônio) ou pela regulação da energia de aquecimento das bobinas de indução, dependendo das taxas de resfriamento. Neste caso não foi aplicada carga na amostra (D). A temperatura no centro da amostra foi medida através de termopar (B) tipo S de 0,1 mm. A alteração de dimensão das amostras ( $\mu\text{m}$ ) foi determinada através do sistema de medição de deslocamento do dilatômetro (C).

Foram simulados doze diferentes ciclos térmicos com diferentes taxas de resfriamento ( $t_{8/5}$  entre 0,59 s a 1680 s), fixando-se a taxa de aquecimento em  $90\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ , uma temperatura de pico em  $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$  e o tempo na máxima temperatura em 2 s. A figura 3.2 exemplifica uma das curvas de ciclo térmico simulada.

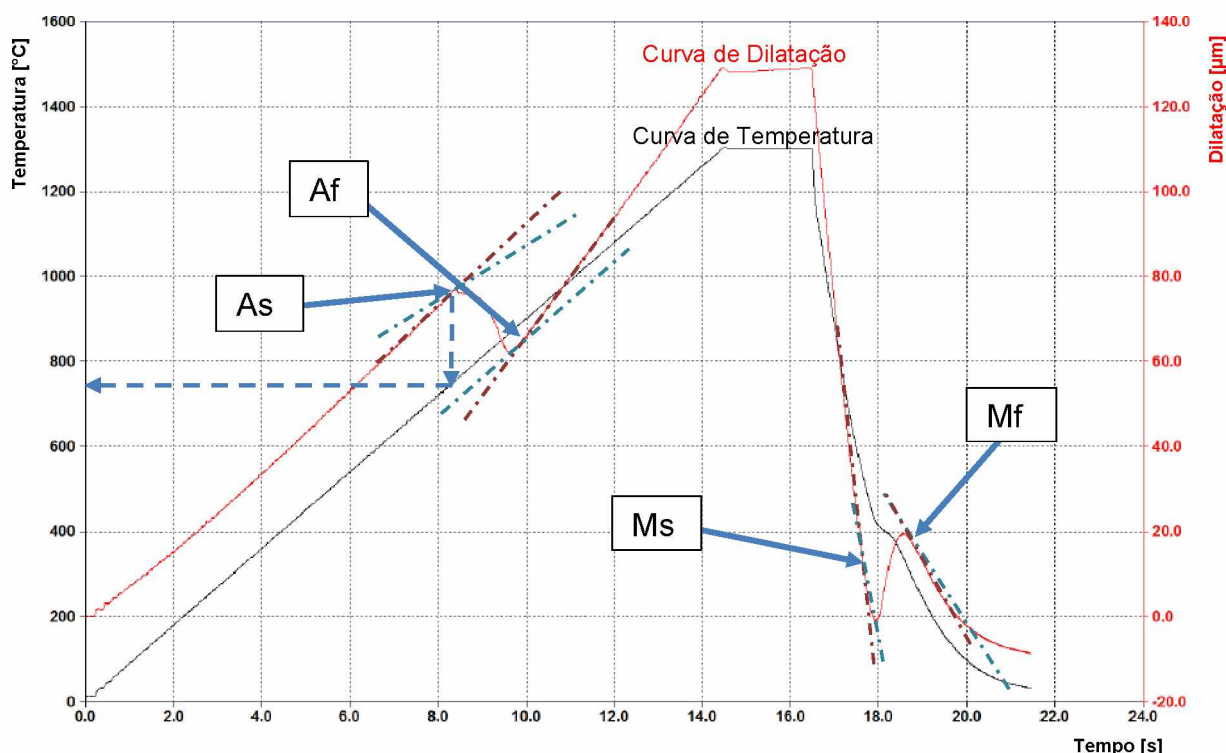


Figura 3.2 –Simulação térmica através de dilatométrica para  $t_{8/5} = 0,6s$ , onde sobre a curva de dilatação, As indica o início da transformação da austenita, Af indica fim da austenitização, Ms o início da transformação martensítica e Mf o fim da transformação martensítica (as temperaturas de transformação são encontradas como esquematizado pelas linhas pontilhadas, analogamente para cada transformação)

Conforme demonstrado na curva da figura 3.2, os pontos de início e fim de transformação são determinados através dos pontos de inflexão da curva de dilatação (um programa computacional do dilatômetro permite a determinação destes pontos de inflexão automaticamente). Consequentemente, as temperaturas de início e fim das transformações através da temperatura da amostra nos momentos dos pontos de inflexão

No caso da curva representada na Figura 3.2, a temperatura de 704 °C foi o início da transformação da estrutura bainítica em austenita (0 % de austenita), sendo que o fim da austenitização (100 % de austenita) ocorreu em 892 °C. No resfriamento, a 478 °C foi possível observar o início da transformação da austenita em martensita (0 % martensita) finalizando a transformação por volta de 276 °C (100 % martensita ou martensita e outro microconstituente), lembrando que a transformação pode não ser completa no caso de austenita residual.

A caracterização dos microconstituintes resultantes em cada simulação térmica foi realizada através de microscopia óptica, após preparação metalográfica da seção transversal de cada amostra e ataque com Nital 4 %, aumento original 500x (50  $\mu m$ ) e 1000x (20  $\mu m$ ). A

caracterização da dureza dos microconstituintes foi feita em microdurômetro em escala Vickers HV10 (média de 5 medições realizadas na amostra).

### **3.2.2 Avaliação da robustez do ensaio de dilatômetro**

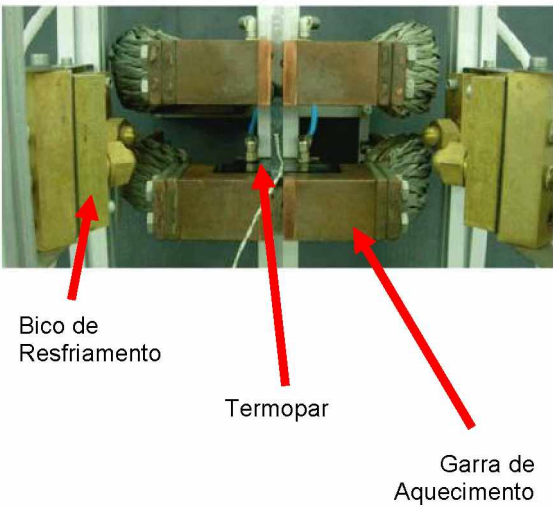
Os testes de dilatometria foram repetidos no Centro de Tecnologia da USIMINAS de forma a avaliar a reprodutibilidade do processo e aderência dos resultados. O aço utilizado se tratava de especificação equivalente, porém, com estrutura inicial, apesar de bainítica, com pequena diferença devido a maior espessura inicial (44,5 mm) da chapa.

Novas amostras deste aço foram submetidas a novos ciclos térmicos como forma de avaliar se o resultado obtido inicialmente tem reprodutibilidade de forma a fornecer consistência suficiente ao atlas de microestrutura criado na etapa anterior. As amostras foram caracterizadas através de análise de microestrutura com ataque Nital 4 % e aumento de 1000x (20µm). A dureza foi medida através de durômetro na escala HV10 em 10 pontos sendo reportados a média e o desvio.

### **3.2.3 Simulação de ciclo térmico na Gleeble**

A simulação de amostras em dilatômetro permite uma amostra homogênea, com grande contribuição para os estudos microestruturais. Porém, a pequena dimensão destas amostras geradas não permite a avaliação das características mecânicas do aço. Desta forma corpos de prova de maior dimensão são necessários para a realização de ensaios Charpy e também de tração, sendo a principal metodologia utilizada na literatura o ensaio Gleeble.

Para este trabalho, os ensaios Gleeble foram realizados em laboratório da Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH (SZMF), em Duisburg, Alemanha, através do procedimento descrito na norma DIN EN ISO 6892-1 em equipamento Gleeble 3500, produzindo 4 grupos de 10 amostras (1 amostra para caracterização metalográfica, ensaio de dureza e tração e 8 amostras para ensaio Charpy entre -100°C e -20°C). A figura 3.3 apresenta de forma geral o equipamento que foi utilizado para os testes.



Parâmetros do simulador Gleeble	
Bicos de resfriamento	4
Fluxo de resfriamento	
Comprimento livre entre as garras	60 mm
Parte Homogênea	Aprox. 10 x 10 x 15 mm
Tamanho da amostra	10 x 10 x 95 mm 11 x 11 x 105 mm
Meio de resfriamento	Mistura Água/Ar
t8/5 típicos	3 a 45 s
Valor máximo de temperatura	1300 °C

Figura 3.3 – Representação do simulador Gleeble 3500 e configurações do sistema do equipamento do laboratório da Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH - SZMF (Duisburg, Alemanha)

A caracterização das propriedades mecânicas foi realizada através de ensaios de dureza, tração e Charpy, em corpos de prova retirados das amostras geradas através de simulação Gleeble. A figura 3.4 demonstra o planejamento realizado na caracterização, seguindo procedimento similar ao que foi adotado pela Voestalpine (2013) em aços X70. Entretanto, no presente trabalho só foi simulado a região de grãos grosseiros (ZAC GG). Já a figura 3.5 ilustra o dimensionamento dos corpos de prova utilizados nesta caracterização.

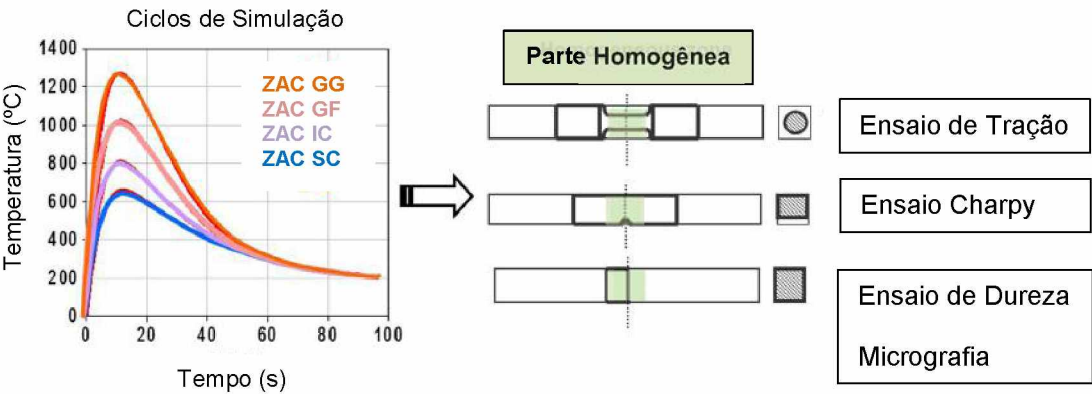


Figura 3.4 – Planejamento esquemático dos testes para caracterização das propriedades mecânicas de aço X70 (VOESTALPINE GROBBLECH GMBH, 2013)



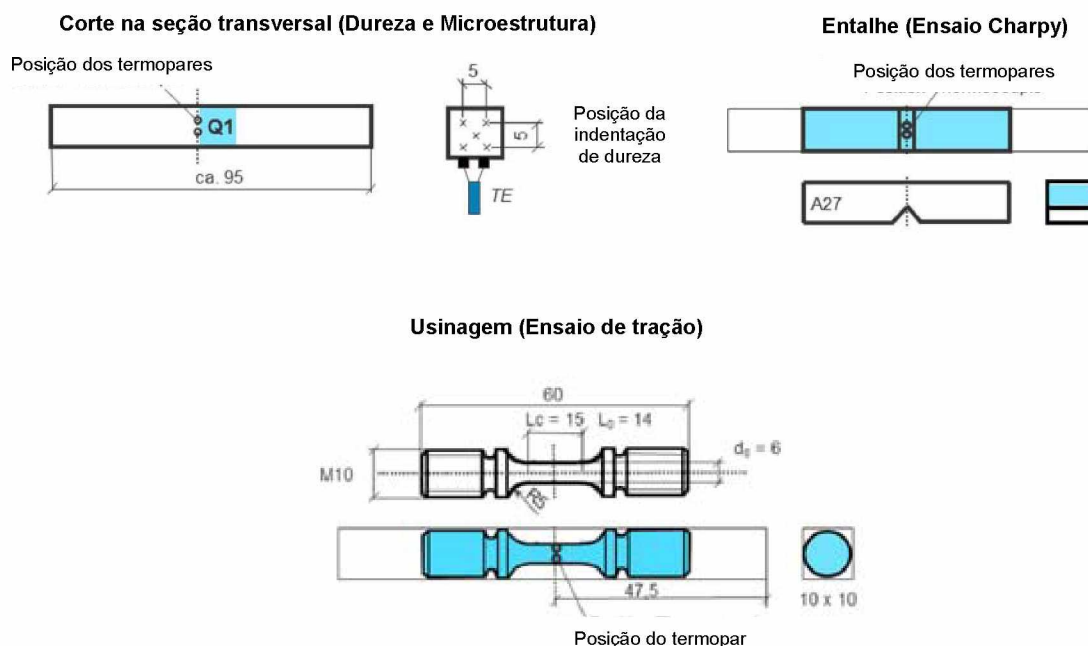


Figura 3.5 – Croqui dos corpos de prova gerados para ensaios mecânicos após simulação em Gleeble (VOESTALPINE GROBBLECH GMBH, 2013)

### 3.2.4 Comparação de resultados das simulações com resultados de soldas reais

Os microconstituintes resultantes das simulações térmicas realizadas através de dilatometria e simulação em Gleeble foram comparados posteriormente com soldas reais, realizadas em empresa de fabricação de estruturas metálicas (CODEME). Para tal, foram retiradas amostras de soldas realizadas por arco submerso (placa de teste com junta T, chanfro semi V, posição filete horizontal, e placa de teste com junta de topo, com chanfro em V, posição plana) e soldagem manual por arame tubular (placa de teste com junta de topo, com chanfros em X e V, posição plana). Foram realizados caracterização macro e microestrutural e de dureza e ensaios de tração e tenacidade.

A caracterização de macroestrutura foi realizada após polimento da amostra soldada e ataque Nital 4 %, como forma de avaliação da qualidade da solda. Após a avaliação da macrografia, a microestrutura foi estudada através de micrografia em microscópio óptico.

O mapeamento da dureza foi realizado de duas formas:

- Mapeamento por linhas de dureza: 3 linhas de medição (passe de raiz - base, passe de preenchimento - meio e passe de acabamento - topo), com uma distância mínima de 0,3 mm entre indentações com carga de 1 kgf (HV1);

- Mapeamento superficial da dureza (UCI-method): uma área selecionada é indentada automaticamente (mais de 5500 pontos são medidos por amostra) com espaçamento de 0,3 mm entre indentações com carga de 0,7 kgf (HV0,7).

O ensaio de tração das amostras foi realizado conforme procedimento de ensaio de tração em seção reduzida, descrito na norma AWS D1.1 (2010). O ensaio de tenacidade das amostras foi realizado com entalhe na posição de linha de fusão deslocado em 1 mm para a ZAC, de forma a selecionar a região de grãos grosseiros da ZAC. As amostras também foram comparadas a previsões feitas por programas computacionais livres disponíveis na internet.

### **3.3 Memorial de cálculo de ganhos**

Para o cálculo de ganhos da utilização do uso desta metodologia na otimização de parâmetros de soldagem, foi selecionado, por falta de outras métricas melhores e mais confiáveis, apenas o ganho relativo ao consumo de gases de aquecimento quando da decisão de não utilização de pré-aquecimento no projeto descrito no Anexo 1, durante as junções em soldagem a arco submerso.

Desta forma, foram utilizados os dados obtidos no processo de fabricação de perfis da empresa CODEME referentes ao consumo específico de gás GLP e oxigênio de forma a determinar o percentual de mistura, a vazão dos bicos chuveiros de pré-aquecimento de soldagem e o tempo utilizado no processo de pré-aquecimento por comprimento soldado. Considera-se, assim, que o consumo dos gases pudesse ser reduzido a zero no caso deste processo ser dispensado.

O efeito da redução de custos foi contabilizado por meio de cálculos simples de quantidade por custo do gás. Para os cálculos de redução de energia e emissão de gases de efeito estufa foi utilizado a metodologia do GHG Protocol, descrita pelo IPCC na publicação "2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Volume 2 - Energy", referente a Liquefied Petroleum Gases e ao Balanço Energético Nacional 2012 (ano base 2011).

Outros ganhos referentes a possibilidade de aumento de velocidade de soldagem, aumento da taxa de deposição entre outros, não farão parte da análise deste trabalho.

## CAPÍTULO IV

### VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DO AÇO SINCRON

Neste capítulo são apresentados os testes preliminares realizados na empresa CODEME. Estes testes visaram a verificação da viabilidade técnica para a execução do projeto de estruturas metálicas utilizando o aço de classe de 65 ksi e os equipamentos atuais da empresa. Chama-se atenção para o fato de que todos os perfis de classe 65 ksi foram projetados de forma soldada, por não haver em território brasileiro empresas com capacidade de fornecimento de perfil laminado com estas características nas dimensões necessárias.

O aço produzido no grau 65 foi adquirido da empresa USIMINAS, que tem realizado a produção deste material através de processo de conformação a quente com resfriamento acelerado (TMCP), também conhecido como linha *Sincron*. Este aço caracteriza-se por microestrutura refinada, constituído basicamente de bainita, perlita fina e ferrita poligonal de acordo com o descrito pelo Centro de Tecnologia da USIMINAS e ilustrado pela figura 4.1. Os detalhes de fabricação deste aço, bem como uma breve avaliação de suas principais características está descrito no anexo II.



Figura 4.1 – Microestrutura de aço grau 65 de 44,5 mm de espessura: ataque Nital 4% e aumento original 500x



Para a análise preliminar, foi utilizado aço Sincron de 44,5 mm de espessura (SINCRON – BHS 450 M) que já se encontrava em estoque na USIMINAS e que atendia as especificações da norma ASTM A572 Grau 65. As suas características básicas estão descritas nas tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1 – Composição química efetiva do aço utilizado nos testes preliminares

%			ppm											
C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Nb	V	Ti	Cr	Ni	Mo	N	B
0,1	0,25	1,49	140	22	210	1530	290	40	130	270	1640	90	41	2

Tabela 4.2 – Características mecânicas efetivas do aço utilizado nos testes preliminares

Amostra	LE (MPa)	LR (MPa)	AL (%)	HV10	CH (-50°C)	RA
1	509	618	23,5	209	310 J	-
2	516	641	21,0	209	215 J	-
3	495	608	25,0	210	317 J	-
4	503	615	24,0	210	242 J	-
Transversal	-	-	-	-	-	66/68

Modenesi et al. (2006) cita que o ensaio de tração de um corpo de prova retirado na direção Z pode ser utilizado para avaliar a sensibilidade à decoesão lamelar de um aço, sendo a redução de área (RA) o parâmetro mais utilizado nesta avaliação. Devido aos resultados de tração de espessura (RA) terem sido superiores a 30 % (nos certificados do material grau 65 fornecidos pela USIMINAS no aço em questão, todos os resultados foram superiores a 60 %), não é esperada nenhuma decoesão lamelar na soldagem dos perfis estruturais. Assim, análises mais detalhadas desta característica não foram necessárias.

A análise de necessidade de pré-aquecimento, conforme anexo I da AWS D1.1 (2010), demonstrou que o aço testado preliminarmente está classificado na Zona I da Figura 4.2 ( $CE=0,42$ ,  $P_{cm}=0,20$ ). O índice de susceptibilidade considerando a solda em SAW com fluxo seco resultou em 3,36 (Grupo B de susceptibilidade) ou, considerando-se nenhum controle de hidrogênio, 3,84 (Grupo C de susceptibilidade). Assim, foram prescritos os níveis de pré-aquecimentos conforme demonstrado na tabela 4.3 (alta restrição foi desconsiderada por se tratar do processo de fabricação de perfil).

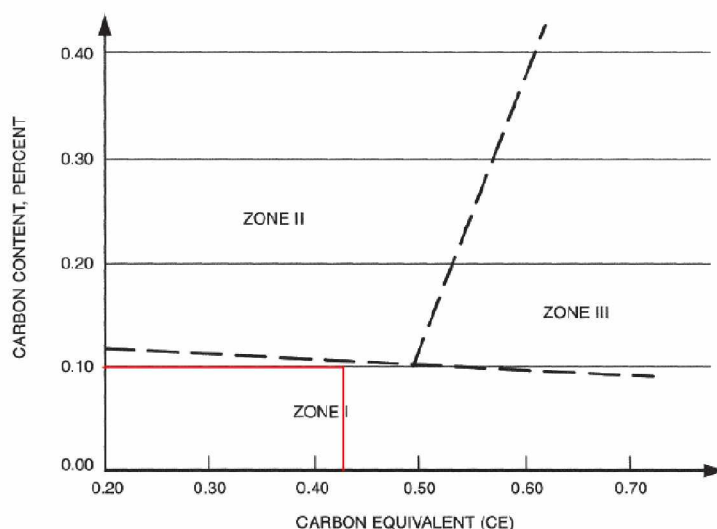


Figura 4.2 – Classificação do diagrama de Graville conforme Anexo I, AWS D1.1 (2010)

Tabela 4.3 – Valores de pré-aquecimento conforme Anexo I, AWS D1.1 (2010)

Restrição	Espessura da Chapa	Índice de Susceptibilidade	
		B	C
1	<10 mm	<20 °C	<20 °C
	10-20 mm	<20 °C	20 °C
	20-38 mm	<20 °C	20 °C
	38-75 mm	20 °C	40 °C
	>75 mm	20 °C	40 °C
2	<10 mm	<20 °C	<20 °C
	10-20 mm	<20 °C	20 °C
	20-38 mm	20 °C	75 °C
	38-75 mm	20 °C	110 °C
	>75 mm	95 °C	140 °C

Com base na análise inicial realizada, foi definido um procedimento preliminar para a soldagem de placas de testes para qualificação de procedimento, utilizando-se o processo FCAW, tanto com a utilização de pré-aquecimento (Índice de Susceptibilidade C) como sem utilização de pré-aquecimento (Índice de Susceptibilidade B).

Apesar de se tratar de um aço fabricado no processo de conformação a quente e resfriamento acelerado (TMCP) e por ter resistência superior a 50 ksi, não foi utilizado o tratamento térmico pós-soldagem, pois não existe requisitos de resistência a impacto, conforme critério descrito no item 3.14 da AWS D1.1:2010. Chama-se atenção para o fato de que devido a utilização da estrutura ser no Brasil e por não haver esforços de

carga cíclica na estrutura, não foi descrito em contrato nenhum requisito para resistência a impacto.

As seguintes condições foram impostas no teste preliminar:

- As placas de teste foram preparadas com chanfro em X, devido a sua espessura de 44,5 mm, sendo 2/3 na face de cima (parte A) e 1/3 na face de baixo (parte B), com utilização de babador e base ponteadada. Não foi utilizado cobre-junta e a posição de soldagem foi a 1G. Uma das placas está demonstrada na Figura 4.3;

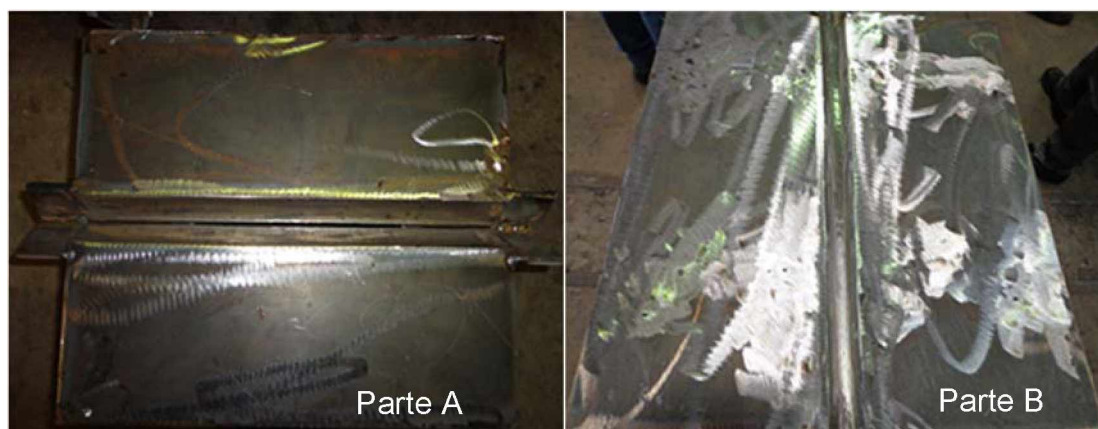


Figura 4.3 – Placa de teste preparada com chanfro em X para teste preliminar do aço ASTM A 572 Grau 65, em procedimento FCAW, na empresa CODEME

- Realizado pré-aquecimento com maçarico de uma das placas de teste até aproximadamente 150°C, de forma mais conservativa que especificado na AWS D1.1 2010 na situação de Susceptibilidade C e Restrição 2, que considera pré-aquecimento mínimo para esta espessura de chapa (38-75mm) de 110 °C;
- No caso da placa de teste sem pré-aquecimento, o mesmo pôde ser realizado conforme descrito no anexo I da AWS D1.1 na situação de Índice de Susceptibilidade B (considerando que existe o controle de hidrogênio) ou com Índice de Susceptibilidade C e Restrição 1 (menor restrição das partes sendo soldadas). Nestes casos, a temperatura máxima de pré-aquecimento necessária de 40 °C se equiparava a temperatura ambiente de 32 °C no dia da realização dos testes. Este procedimento é preferencial por permitir menor tempo de execução e redução do custo devido a não consumo de gás para aquecimento da chapa;
- Utilizado arame tipo ESAB TUBROD 81 NI1 ULTRA de diâmetro de 1,6 mm em conformidade com a especificação AWX A5.29 E8XTX descrito na AWS D1.1

(2010). Este arame tem como especificação a utilização com mínima taxa de deposição de 2,75 kg/h (parâmetros de corrente de 190 A e tensão de 27 V) e máxima taxa de deposição de 9,11 kg/h (parâmetros de corrente de 500 A e tensão de 39 V);

- A polaridade utilizada para a realização da soldagem foi corrente contínua positiva;
- Utilizado gás de proteção CO<sub>2</sub>, com pureza de 99,99%, a uma vazão de 15 litros/minuto;
- A solda no chanfro A foi realizada com 27 passes com temperatura interpasse controlada para ser inferior a 300°C e limpeza entre passes realizada com escova metálica. A soldagem foi dividida em três momentos, a saber, passe de raiz, preenchimento e acabamento. Os ajustes da máquina de solda foram realizados pelos soldadores, conforme experiência própria, de forma a melhor controlar a deposição do material durante a soldagem, sendo recomendado que estivessem em uma faixa de 200 A a 300 A e 27 V a 35 V, pelo fabricante ESAB;

*Nota: Todo o processo foi realizado por soldadores qualificados e acompanhado por inspetor de soldagem da empresa CODEME. Participaram também dos testes as empresas CBMM (cliente), ESAB (fabricante dos consumíveis) e USIMINAS (fabricante das chapas).*

- Foi realizada a remoção da raiz (goivagem) antes do início da soldagem do segundo lado da chapa de teste;
- A solda no chanfro B foi realizada com 12 passes, com o mesmo procedimento do chanfro A da chapa de teste;
- As leituras de tensão e corrente foram realizadas conforme prática industrial, através de voltímetro e amperímetro da máquina de solda. Desta forma, os erros inerentes não serão levados em conta aqui. O tempo médio de soldagem foi medido através de cronometro, operado por inspetor de soldagem da CODEME e a energia média consumida por passe calculada através da equação 4. O resumo dos resultados está descrito na tabela 4.4.

$$E = U \cdot I \cdot t, \quad (4)$$

onde:

E = Energia consumida por passe (J)

U = Diferença de potencial média por passe (V)

I = Intensidade de corrente média por passe (A)

t = Tempo médio por passe (s)

Tabela 4.4 – Monitoramento das variáveis e energia consumida durante as soldagens dos testes preliminares

Placa de teste	U	I	Tempo	Energia
	V	A	s	kJ
<b>CP 01 Lado A 2/3</b>	<b>Com pré-aquecimento</b>			
Passe Raiz	29,2	288	81	684,0
Passe Preenchimento	29,3	292	63	540,9
Passe Acabamento	28,5	290	45	375,2
<b>CP 01 Lado B 1/3</b>	<b>Com pré-aquecimento</b>			
Passe Raiz	29,7	283	97	815,3
Passe Preenchimento	29,5	292	68	588,0
Passe Acabamento	28,8	282	52	423,8
<b>CP 02 Lado A 2/3</b>	<b>Sem pré-aquecimento</b>			
Passe Raiz	32	232	77	571,6
Passe Preenchimento	32	232	55	408,3
Passe Acabamento	28	226	49	310,1
<b>CP 02 Lado B 1/3</b>	<b>Sem pré-aquecimento</b>			
Passe Raiz	30	235	80	564,0
Passe Preenchimento	30	233	50	349,5
Passe Acabamento	29	232	46	309,5

Os resultados detalhados dos ensaios realizados nas placas de teste preliminar estão descritos no Anexo III. Demonstra-se que mesmo com a grande variação da energia consumida por passe, diferentes soldadores e diferentes condições de pré-aquecimento, o aço não apresentou variação em seus resultados (sejam eles microestruturais, resistência à tração e dureza). Mas isto não quer dizer que o aço poderia ser soldado com qualquer das condições, já que o resultado reflete a combinação das condições.

O Centro de Tecnologia da USIMINAS realizou testes complementares deste aço de forma a avaliar a necessidade de pré-aquecimento, utilizando o Ensaio Tekken - JIS Z 3158 e o Ensaio de Dureza Máxima - JIS Z 3101, sendo os resultados coerentes com a proposta e resultados aqui obtidos. O aço em questão apresenta baixa susceptibilidade a ocorrência de trincas induzidas por hidrogênio, não necessitando pré-aquecimento ratificados pela avaliação do método gráfico da indústria naval japonesa, resultados do ensaio Tekken e ensaio de Dureza Máxima, de acordo com esta avaliação. A recomendação do fabricante é de que o aço estrutural Sincron pode ser utilizado como uma excelente alternativa para redução de custos de fabricação, principalmente em soldagem de reparo, onde são empregados baixos aportes térmicos.

Conclui-se, desta forma, que o aço em questão tem baixa susceptibilidade a problemas de solda, como esperado devido a seu baixo carbono equivalente e baixa quantidade de elementos de liga. Existe, desta forma, a possibilidade por parte da CODEME de realizar a fabricação das estruturas desta nova categoria de aço estrutural sem necessidade de alterações maiores em seu processo, como por exemplo, a necessidade de aquisição de novas máquinas ou realização de mudanças de processo associada a realização de pré-aquecimento obrigatório. Entretanto, um estudo mais pormenorizado ainda é necessário de forma a comprovar que a situação é válida para os demais procedimentos de soldagem e ciclos térmicos esperados.

## CAPÍTULO V

### ENSAIOS, RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 5.1 Simulação de ciclos térmicos em amostras do aço em dilatômetro

##### 5.1.1 Dados do Ensaio Inicial

Foram impostos doze ciclos térmicos através do dilatômetro DIL805A/D sobre amostras no formato de tiras com dimensões de 7 x 4 x 1,3 mm (centro e sentido da laminação da chapa), conforme descrito na tabela 5.1. Usou-se uma amostra referenciada como 1, sem tratamento térmico, para caracterização da estrutura original.

Tabela 5.1 – Parâmetros dos ciclos térmicos simulados nas amostras do aço em dilatometria (ensaio inicial)

ID	Taxa de aquecimento (°C/s)	Temperatura de pico (°C)	Tempo de manutenção na temperatura de pico (s)	Tempo t8/5 (s)
2	90	1300	2	0,6
3	90	1300	2	1,8
4	90	1300	2	2,6
5	90	1300	2	6,4
6	90	1300	2	13,3
7	90	1300	2	26,1
8	90	1300	2	52,0
9	90	1300	2	104,0
10	90	1300	2	208,0
11	90	1300	2	416,0
12	90	1300	2	832,0
13	90	1300	2	1680,0

A tabela 5.2 resume as temperaturas de início e fim de transformação do ensaio inicial. Os ciclos térmicos impostos estão detalhados no Apêndice I.

Tabela 5.2 – Identificação de temperaturas de início e fim de transformação nos ciclos térmicos simulados (ensaio inicial) em amostras do aço em dilatômetro

ID	Temperaturas de transformação
<b>2 (<math>t_{8/5}= 0,6</math> s)</b>	Ms = 478 °C Mf = 276 °C
<b>3 (<math>t_{8/5}= 1,8</math> s)</b>	Bs = 545 °C Bf/Ms = 444 °C Mf = 302 °C
<b>4 (<math>t_{8/5}= 2,6</math> s)</b>	Bs = 555 °C Bf/Ms = 402 °C Mf = 318 °C
<b>5 (<math>t_{8/5}= 6,4</math> s)</b>	Bs = 605 °C Bf/Ms = 453 °C Mf = 353 °C
<b>6 (<math>t_{8/5}= 13,3</math> s)</b>	Bs = 633 °C Bf/Ms = 465 °C Mf = 382 °C
<b>7 (<math>t_{8/5}= 26,1</math> s)</b>	Bs = 662 °C Bf = 485 °C
<b>8 (<math>t_{8/5}= 52,0</math> s)</b>	Bs = 680 °C Bf = 492 °C
<b>9 (<math>t_{8/5}= 104,0</math> s)</b>	P/Fs = 701 °C P/Ff/Bs = 658 °C Bf = 490 °C


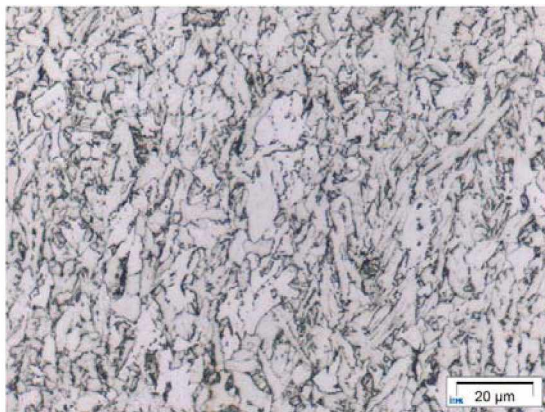


<b>10 (<math>t_{8/5} = 208,0</math> s)</b>	<p>P/Fs = 706 °C</p> <p>P/Ff/Bs = 638 °C</p> <p>Bf = 470 °C</p>
<b>11 (<math>t_{8/5} = 416,0</math> s)</b>	<p>P/Fs = 714 °C</p> <p>P/Ff/Bs = 625 °C</p> <p>Bf = 473 °C</p>
<b>12 (<math>t_{8/5} = 832,0</math> s)</b>	<p>P/Fs = 714 °C</p> <p>P/Ff/Bs = 623 °C</p> <p>Bf = 490 °C</p>
<b>13(<math>t_{8/5} = 1680,0</math> s)</b>	<p>P/Fs = 750 °C</p> <p>P/Ff/Bs = 620 °C</p> <p>Bf = 500 °C</p>





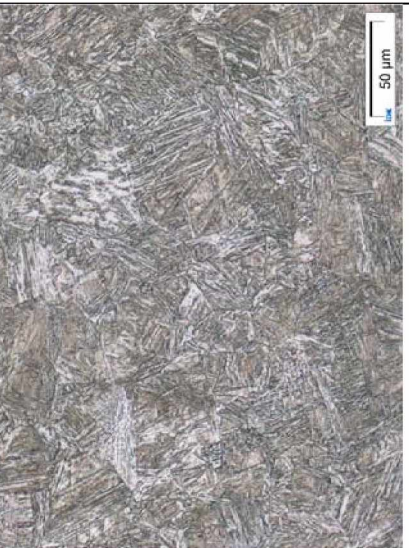

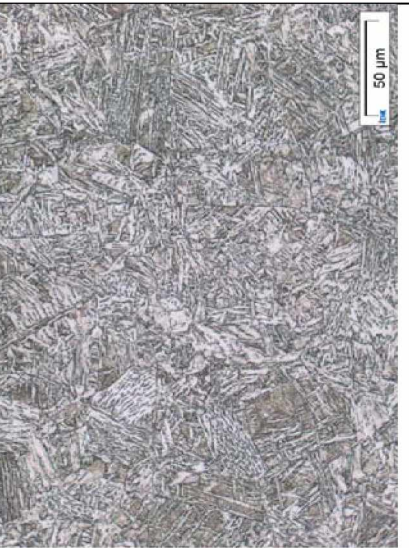

### 5.1.2 Caracterização dos microconstituintes e dureza nas amostras simuladas em dilatômetro (ensaio inicial)

Cada amostra foi seccionada no centro, para que a seção transversal pudesse ser usada para caracterização microestrutural e de micro dureza. A Tabela 5.3 apresenta microestruturas típicas representando o centro da seção transversal de cada amostra, enquanto a Tabela 5.4 apresenta a correspondente dureza.






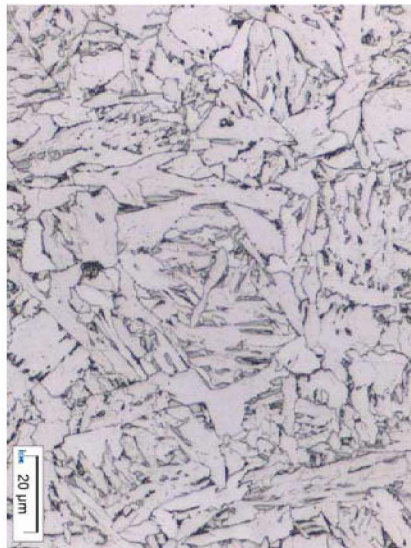
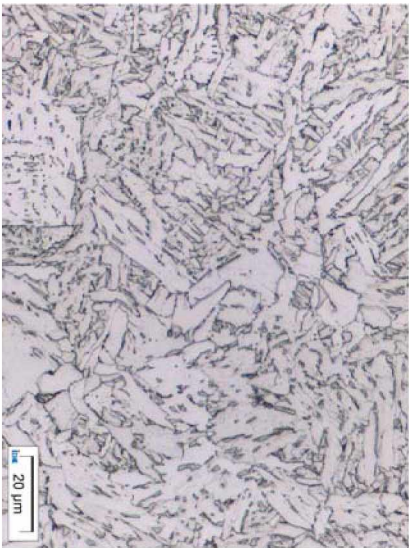

Tabela 5.3 – Micrografias típicas das seções transversais das amostras em função do tempo de resfriamento imposto em 800 e 500 °C após ensaio inicial

ID	Ampliação aproximada de 500x	Ampliação aproximada de 1000x
<b>1 (original)</b>		



2 ( $t_{8/5} = 0,6 \text{ s}$ )		
3 ( $t_{8/5} = 1,8 \text{ s}$ )		
4 ( $t_{8/5} = 2,6 \text{ s}$ )		
5 ( $t_{8/5} = 6,4 \text{ s}$ )		



9 ( $t_{8/5}= 104,0$ s)	8 ( $t_{8/5}= 52,0$ s)	7 ( $t_{8/5}= 26,1$ s)	6 ( $t_{8/5}= 13,3$ s)
			
			






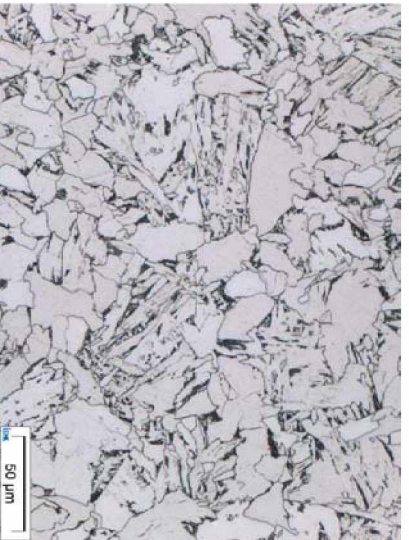
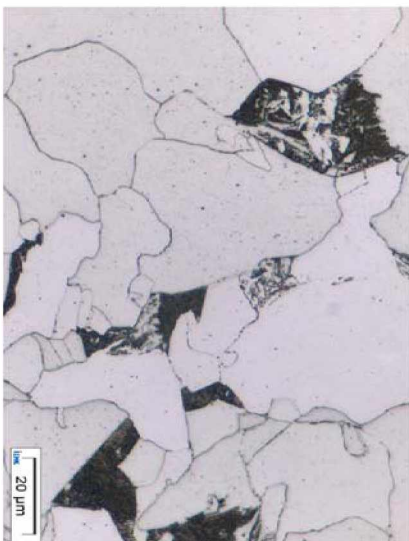
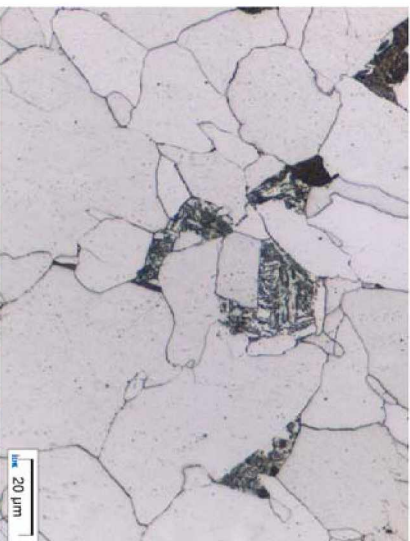
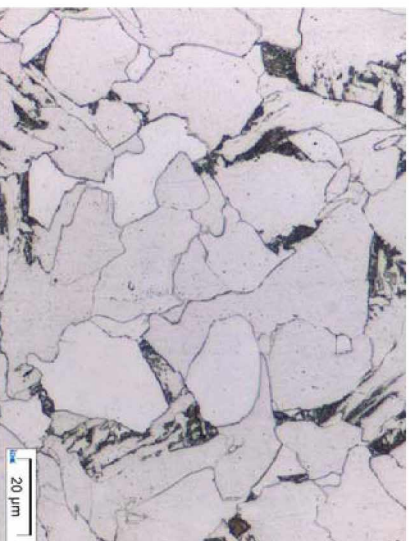
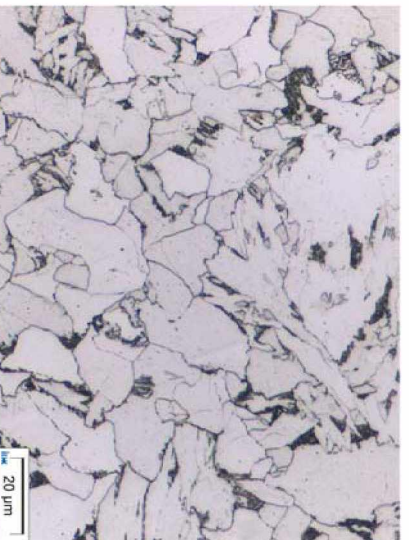
13( $t_{8/5}= 1680,0$ s)	12 ( $t_{8/5}= 832,0$ s)	11 ( $t_{8/5}= 416,0$ s)	10 ( $t_{8/5}= 208,0$ s)
			
			

Tabela 5.4 – Dureza média (HV10) das seções transversais das amostras em função do tempo de resfriamento imposto em 800 e 500 °C após ensaio inicial

ID	Dureza (HV10) $\pm$ 1 desvio-padrão
1 (original)	190 $\pm$ 8 (n=5)
2 (t8/5= 0,6 s)	348 $\pm$ 12 (n=5)
3 (t8/5= 1,8 s)	317 $\pm$ 15 (n=5)
4 (t8/5= 2,6 s)	281 $\pm$ 10 (n=5)
5 (t8/5= 6,4 s)	240 $\pm$ 10 (n=5)
6 (t8/5= 13,3 s)	222 $\pm$ 7 (n=5)
7 (t8/5= 26,1 s)	199 $\pm$ 8 (n=5)
8 (t8/5= 52,0 s)	187 $\pm$ 8 (n=5)
9 (t8/5= 104,0 s)	178 $\pm$ 4 (n=5)
10 (t8/5= 208,0 s)	172 $\pm$ 6 (n=5)
11 (t8/5= 416,0 s)	166 $\pm$ 5 (n=5)
12 (t8/5= 832,0 s)	158 $\pm$ 4 (n=5)
13(t8/5= 1680,0 s)	138 $\pm$ 5 (n=5)

Verifica-se que o aço teve comportamento conforme esperado, com pequena formação de martensita, devido ao baixo teor de carbono, e com microestrutura original entre as simulações 7 e 8, que tem tempo de resfriamento equivalente ao da produção das chapas no laminador da USIMINAS. O aumento do tamanho de grão é função do tempo acima da temperatura de transformação e também coerente com o simulado. A dureza, em estruturas mais homogêneas como as acima se torna comparável.

### 5.1.3 Levantamento do diagrama CCT do aço Sincron após ensaio inicial

A partir desta caracterização microestrutural e de dureza, complementada pelas medições de início e fim de transformação, realizadas automaticamente no dilatômetro durante a execução das curvas de resfriamentos na simulação durante o ensaio inicial, representados na Tabela 5.2, foi levantada a curva CCT para o aço, como mostra a Figura 5.1.

A quantificação de fases foi realizada utilizando o software SIS Olympus Analysis 5.0, na Universidade de Aachen. O método de avaliação se inicia por checagem de metalografista com experiência, identificando os tipos de estrutura e homogeneidade das fases na amostra.

Para tal, o aumento é selecionado de acordo com o material, de forma a caracterizar as estruturas de interesse. A escala de cinza é ajustada com duas possibilidades (automática ou manual) de forma a diferenciar as diferentes estruturas de interesse por cor. Para melhorar a precisão da classificação, pode-se adicionalmente utilizar um banco de dados de morfologia de estruturas. Um exemplo de estrutura com dificuldade para seleção automática por escala de cinza é a bainita e martensita nos aços. As estruturas são classificadas individualmente de acordo com microestruturas presentes no material pré-selecionado (aço carbono, ferro fundido, aço inox e outros). Após a seleção automática do software ou caso o mesmo não tenha tido a capacidade de classificar a microestrutura pela escala de cinza ou banco de dados, um metalografista experiente pode alterar cada fração selecionada para a fase estimada. O valor percentual de cada fase é então armazenado em uma folha de dados de medição. O número de medições em locais diferentes de cada amostra dependerá da heterogeneidade das estruturas, sendo que quanto maior a heterogeneidade, maior será o número de regiões exploradas. As quantidades por fase presentes nas folhas de dados de cada medição são contabilizadas e os percentuais médios calculados para a amostra. Após a finalização da análise em uma amostra, outra amostra pode ser iniciada com nova folha de dados utilizando preferencialmente os mesmos parâmetros já ajustados para classificação ou pode ser necessário novo ajuste caso as microestruturas sejam diferentes da primeira.

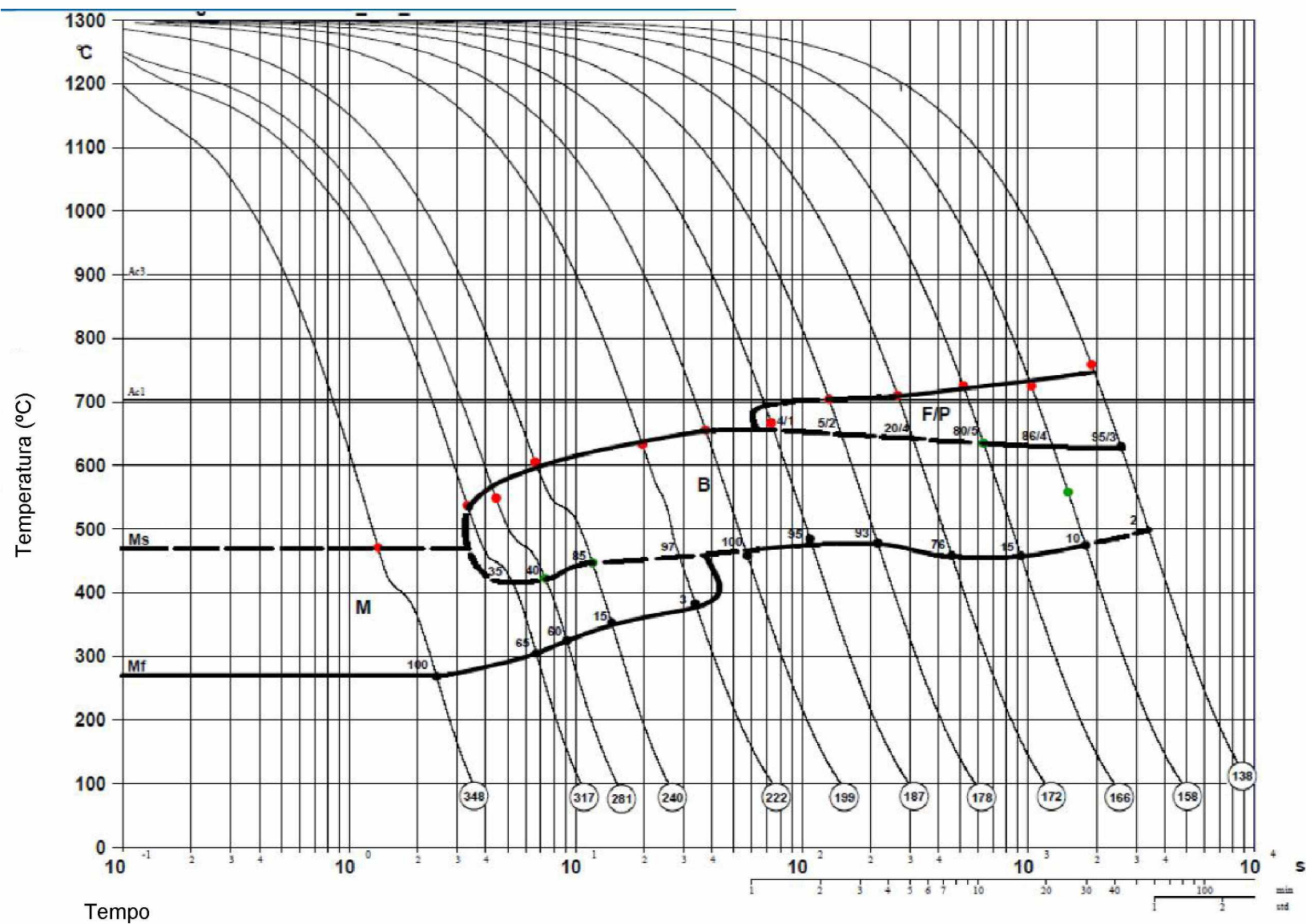


Figura 5.1 – Diagrama CCT do aço ASTM A572 grau 65 estudado levantado a partir dos dados apresentados na seção transversal



#### 5.1.4 Avaliação da robustez dos resultados do ensaio em dilatômetro (ensaio robustez)

Os testes com dilatometria foram repetidos no Centro de Tecnologia da USIMINAS, sendo os resultados utilizados aqui como forma de avaliar a sensibilidade do ensaio dilatométrico frente a pequenas variações em parâmetros de ensaio. O aço utilizado era de especificação equivalente, porém, com maior espessura inicial (44,5 mm contra 25 mm), composição química diferente (demonstrado na tabela 5.6) e microestrutura inicial menos homogênea e com características anisotrópicas (com linhas de laminação, como ilustra a tabela 5.5). As diferenças entre as condições experimentais foram o equipamento utilizado, o tempo de manutenção na temperatura máxima de aquecimento, que passou de 2 para 1 segundo, e a temperatura máxima, que passou de 1300 °C para 1350 °C.

Os ciclos térmicos impostos estão descritos na tabela 5.7 e os resultados demonstrados na tabela 5.8. De forma similar a seção 5.1, a amostra referenciada como A representa a estrutura inicial do aço sem tratamento térmico.

Tabela 5.5 – Comparação das microestruturas originais dos aços utilizados nas simulações nas seções 5.1.2 e 5.1.4


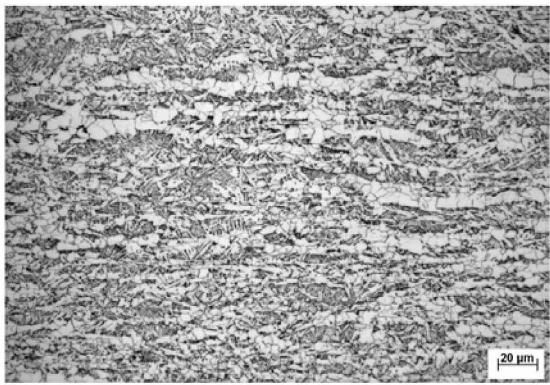
	Aço seção 5.1.2 (t = 25 mm; Ceq = 0,35)	Aço seção 5.1.4 (t = 44,5 mm; Ceq = 0,38)
Microestrutura inicial		

Tabela 5.6 – Comparação da composição química dos aços utilizados na simulação da seção 5.1.2 e na seção 5.1.4


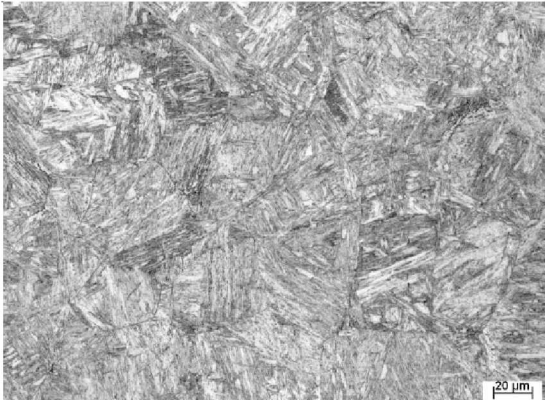
Teste	C	Ceq	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Nb	V	Ti	Cr	Ni	Mo	Sn	N	B	Ca	Sb	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
5.1.4	0,100	0,380	0,250	1,490	0,014	0,002	0,018	0,143	0,028	0,004	0,013	0,027	0,164	0,006	0,001	0,004	0,000	0,000	0,000	0,001
5.1.2	0,070	0,350	0,280	1,620	0,018	0,001	0,023	0,143	0,024	0,002	0,014	0,025	0,160	0,003	0,001	0,004	0,000	0,000	0,000	0,005

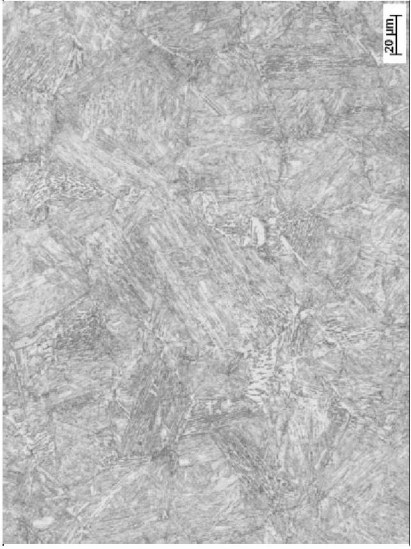





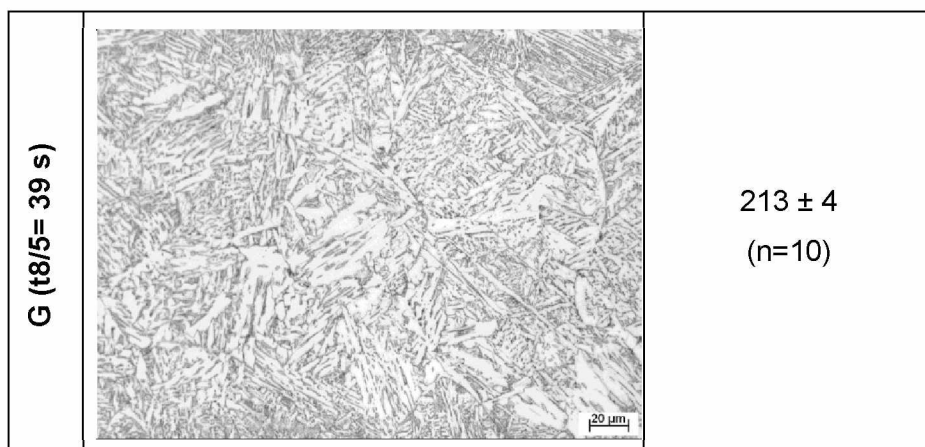
Tabela 5.7 – Parametrização dos ciclos térmicos simulados (ensaio robustez) nas amostras do aço em dilatometria pelo Centro de Tecnologia da USIMINAS

ID	Taxa de aquecimento (°C/s)	Temperatura de pico (°C)	Tempo de manutenção na temperatura de pico (s)	Tempo t <sub>8/5</sub> (s)
B	90	1350	1	2
C	90	1350	1	5
D	90	1350	1	8
E	90	1350	1	12
F	90	1350	1	24
G	90	1350	1	39

Tabela 5.8 – Micrografias típicas e dureza média das seções transversais das amostras em função do tempo de resfriamento imposto em 800 e 500 °C de simulação realizada (ensaio robustez) pela Centro de Tecnologia da USIMINAS

ID	Ampliação aproximada de 500x	Dureza (HV10) ± 1 desvio-padrão
A (original)		210
B (t <sub>8/5</sub> = 2 s)		378 ± 8 (n=10)

C (t8/5= 5 s)		343 ± 10 (n=10)
D (t8/5 = 8 s)		292 ± 13 (n=10)
E (t8/5= 12 s)		246 ± 16 (n=10)
F (t8/5= 24 s)		232 ± 4 (n=10)



Os resultados se demonstraram comparáveis aos obtidos pelo CCT da Figura 5.1 em termos de microestrutura e dureza, mesmo com pequenas diferenças no ciclo térmico aplicado em termos de temperatura máxima e tempo na temperatura máxima. As diferenças encontradas nas durezas, principalmente em elevadas taxas de resfriamento, conforme demonstrado pela Figura 5.2, se referem provavelmente a diferença na composição química dos materiais (principalmente percentual de carbono) e parâmetros de testes. Entretanto, estas diferenças não são tão elevadas.

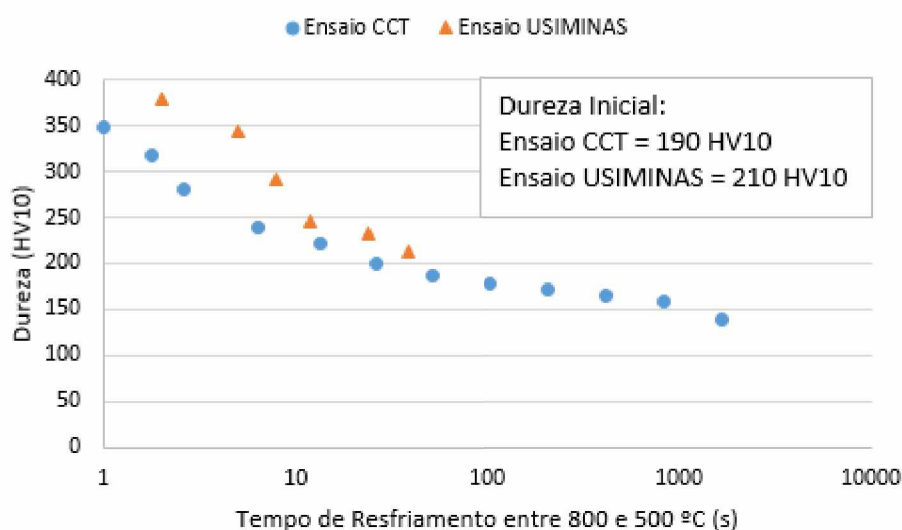



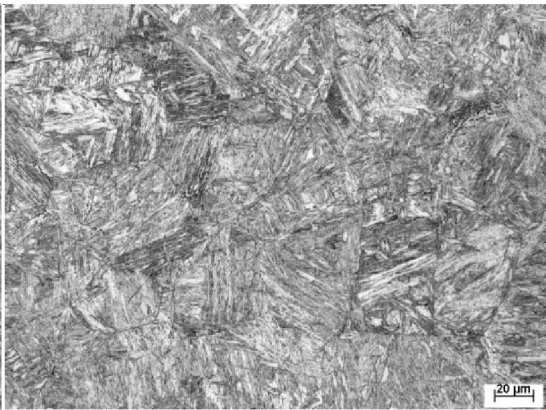
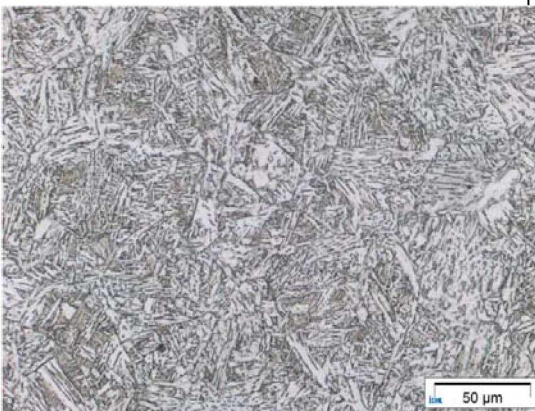

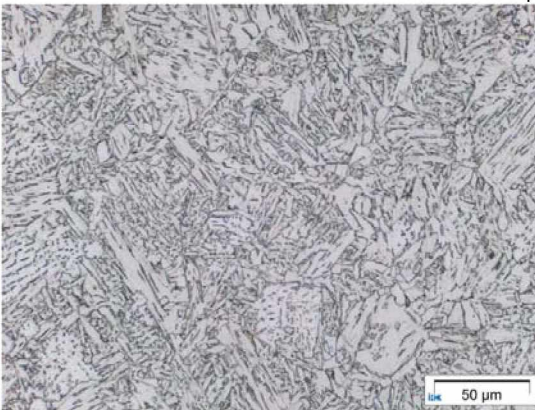

Figura 5.2 – Comparativo de dureza entre as amostras simuladas no dilatômetro da Universidade de Aachen (ensaio inicial – dureza do material de base de 190 HV10) e da USIMINAS (ensaio robustez – dureza do material de base de 210 HV10)

Por outro lado, as microestruturas com aproximadamente mesma velocidade de resfriamento não apresentaram diferenças significantes, como ilustra a tabela 5.9. Desta forma, a simulação mostrou-se robusta, mesmo com pequena variação nas composições



químicas dos aços, nas espessuras de chapas e, conseqüentemente, na microestrutura inicial. Isto pode se dever ao bom controle de fabricação, principalmente dos níveis de carbono e microligantes, conforme descrito por Stalheim & Muralidharan (2006).

Tabela 5.9 – Tabela comparativa de microestruturas entre as amostras simuladas no dilatômetro da Universidade de Aachen (ensaio inicial) e da USIMINAS (ensaio robustez)

<b>t8/5</b>	<b>Ensaio Inicial</b>	<b>Ensaio Robustez</b>
<b>2 s</b>	 t8/5 = 1,8 s	 t8/5 = 2 s
<b>12,5 s</b>	 t8/5 = 13,3 s	 t8/5 = 12 s
<b>25 s</b>	 t8/5 = 26,1 s	 t8/5 = 24 s

## 5.2 Simulação de amostras do aço em Gleeble

Foram selecionadas, com base nas limitações em possíveis velocidades de resfriamento do equipamento Gleeble e nas condições de maior interesse, quatro parâmetros de ensaio visando a obtenção de composições microestruturais, a saber:

I - predominantemente martensítica;

II e III – bainíticas;

IV - ferrita/perlita + bainita.

Estes parâmetros foram aplicados no ensaio Gleeble, conforme matriz experimental mostrada na Tabela 5.10, em amostras de tamanho 10,5 x 10,5 x 110 mm de mesmo aço do ensaio em dilatômetro (ensaio inicial – seção 5.1.2,  $t = 25$  mm).

Tabela 5.10 – Parametrização dos ciclos térmicos simulados nas amostras do aço (Ensaio Gleeble)

ID	Taxa de aquecimento (°C/s)	Temperatura de pico (°C)	Tempo de manutenção na temperatura de pico (s)	Tempo $t_{8/5}$ (s)
I	90	1300	2	4
II	90	1300	2	10
III	90	1300	2	25
IV	90	1300	2	70

A figura 5.3 apresenta o resumo das condições dos testes realizados. Por ela é possível notar que os resultados reais de temperatura máxima e tempo de resfriamento 800 °C a 500 °C, respeitaram o planejamento apresentado na tabela 5.8. Neste ensaio não foi identificado as temperaturas de transformações de fase, já que o enfoque foi medição de propriedades mecânicas.

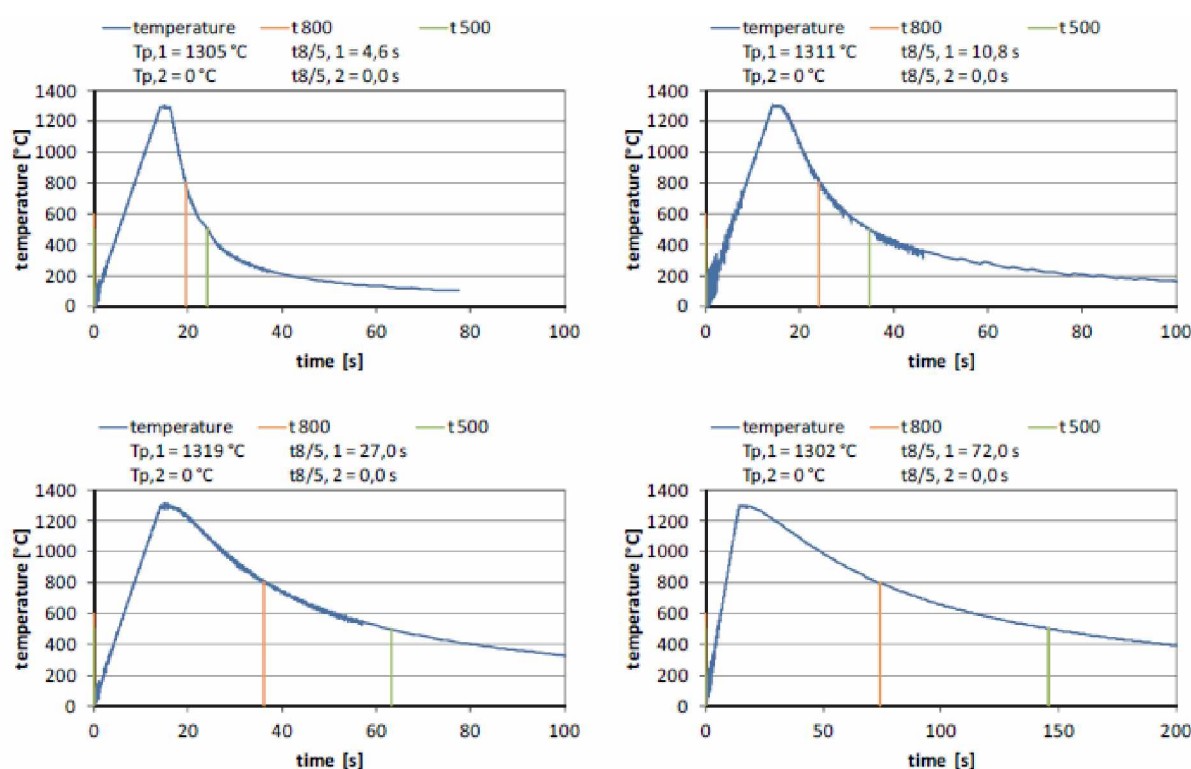


Figura 5.3 – Ciclos térmicos, e respectivos parâmetros, das simulações nas amostras do aço (Ensaio Gleeble)

### 5.2.1 Caracterização de dureza e microestruturas das amostras simuladas na Gleeble

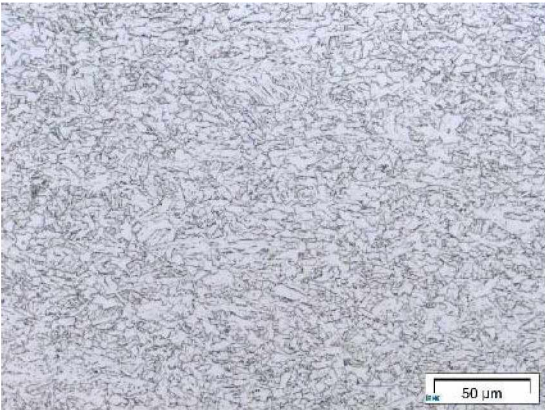
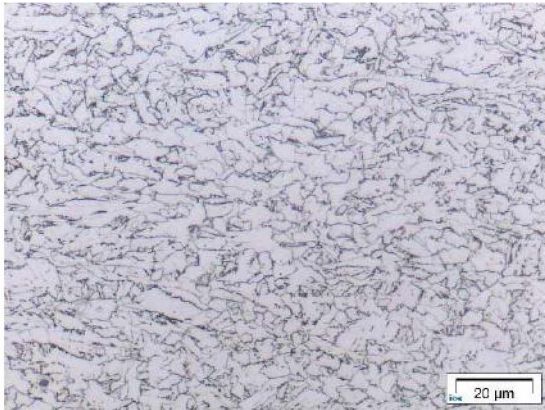
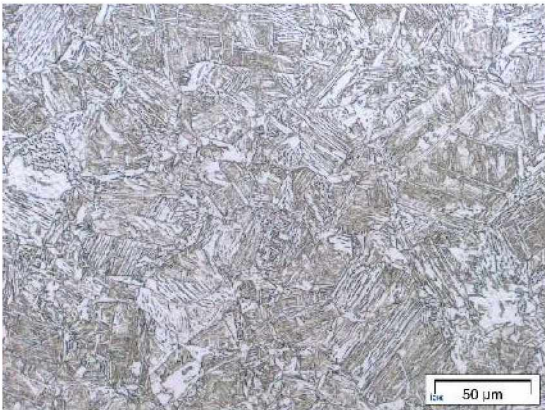
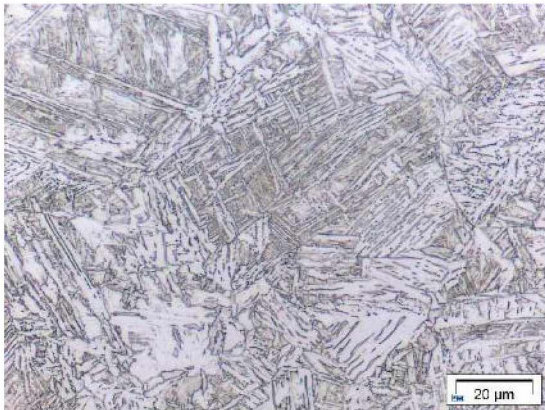
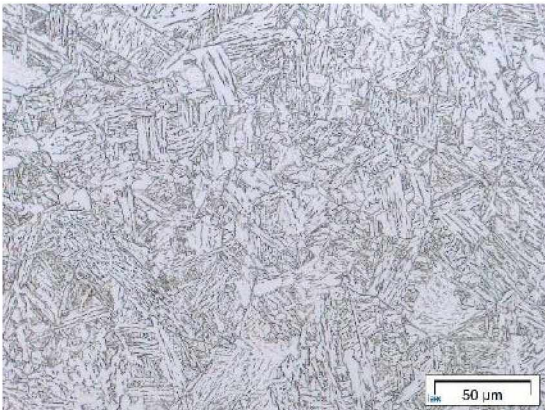

Após simulação térmica, as amostras foram caracterizadas quanto à microestrutura (tabela 5.12) e dureza (tabela 5.13). A quantificação da microestrutura foi feita por técnica de tratamento de imagem nas micrografias utilizando a mesma metodologia descrita no item 5.1.3. Contabilizando-se ponderadamente a proporção de cada fase foi construída a tabela 5.11.

Tabela 5.11 – Quantificação de microconstituintes das seções transversais das amostras de aço simuladas em Gleeble em função do tempo de resfriamento imposto em 800 e 500 °C

ID	% Martensita	% Bainita	% Perlita	% Ferrita
0 (original)	0	100	0	0
I (t8/5= 4,6 s)	55	45	0	0
II (t8/5= 10,8 s)	0	100	0	0
III (t8/5= 27,0 s)	0	99	0	1
IV (t8/5= 72,0 s)	2	93	1	4



Tabela 5.12 – Micrografias típicas das seções transversais das amostras de aço simuladas em Gleeble em função do tempo de resfriamento imposto em 800 e 500 °C

ID	Ampliação aproximada de 500x	Ampliação aproximada de 1000x
0 (original)		
I (t8/5= 4,6 s)		
II (t8/5= 10,8 s)		



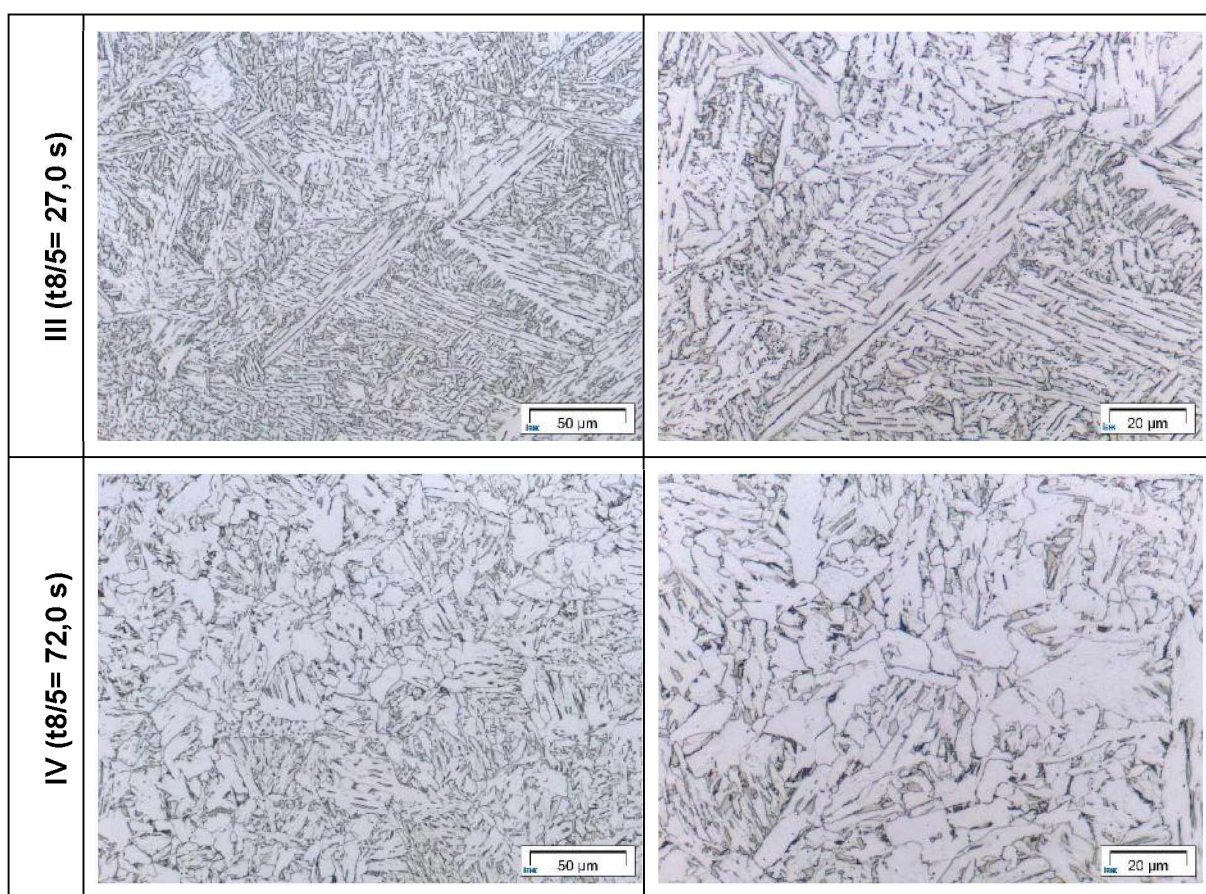


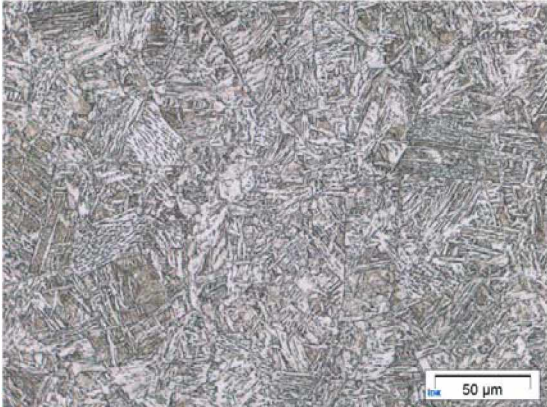
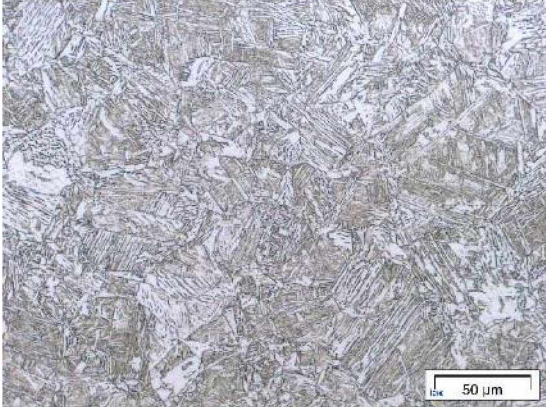
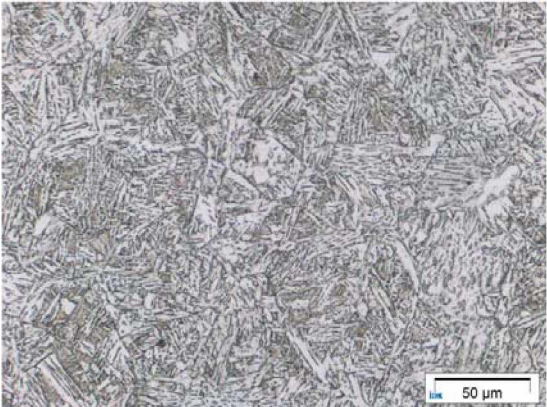
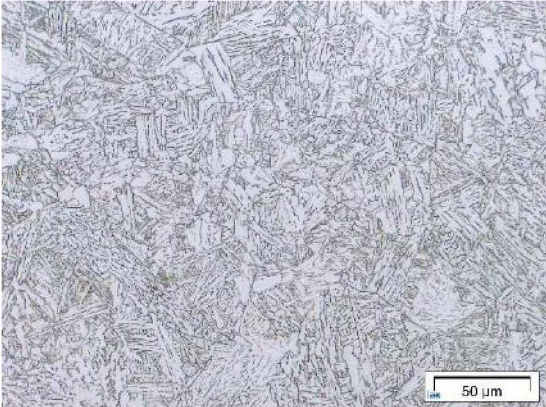
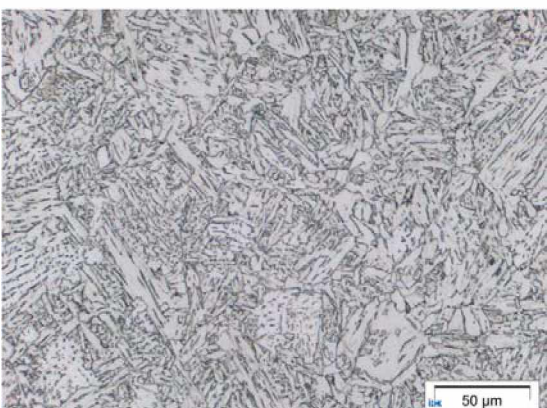
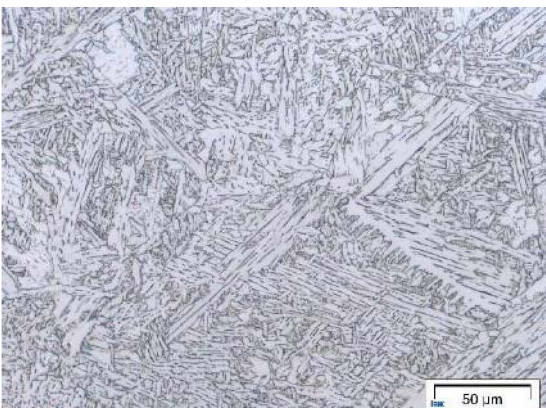
Tabela 5.13 – Dureza média das seções transversais das amostras de aço simuladas em Gleeble em função do tempo de resfriamento imposto em 800 e 500 °C

ID	Dureza (HV10) $\pm$ 1 desvio-padrão
0 (original)	175 $\pm$ 4 (n=3)
I (t8/5= 4,6 s)	277 $\pm$ 6 (n=3)
II (t8/5= 10,8 s)	222 $\pm$ 2 (n=3)
III (t8/5= 27,0 s)	202 $\pm$ 1 (n=3)
IV (t8/5= 72,0 s)	187 $\pm$ 6 (n=3)

Para se certificar de que as condições do Ensaio Gleeble foram comparáveis às do Ensaio Inicial, foram realizadas comparações microestruturais (tabela 5.14) e de dureza (Figura 5.4) das amostras de ambos os ensaios.



Tabela 5.14 – Comparativo de microestruturas entre as amostras simuladas no dilatômetro da Universidade de Aachen (ensaio dilatômetro) e da SZMF (ensaio Gleeble)

Ensaio Inicial	Ensaio Gleeble
 <p data-bbox="448 880 616 913"><math>t_{8/5} = 6,4 \text{ s}</math></p>	 <p data-bbox="1054 880 1222 913"><math>t_{8/5} = 4,6 \text{ s}</math></p>
 <p data-bbox="437 1355 627 1388"><math>t_{8/5} = 13,3 \text{ s}</math></p>	 <p data-bbox="1043 1355 1233 1388"><math>t_{8/5} = 10,8 \text{ s}</math></p>
 <p data-bbox="437 1830 627 1863"><math>t_{8/5} = 26,1 \text{ s}</math></p>	 <p data-bbox="1054 1830 1222 1863"><math>t_{8/5} = 27 \text{ s}</math></p>

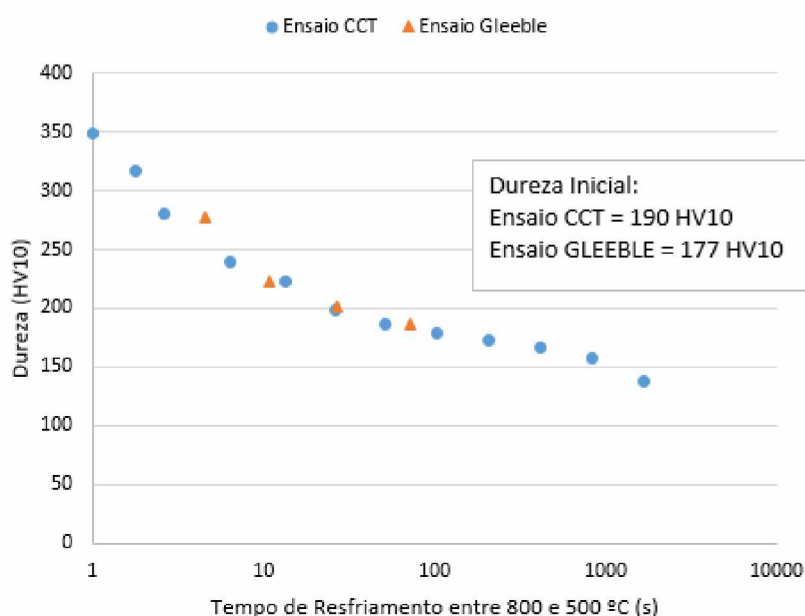
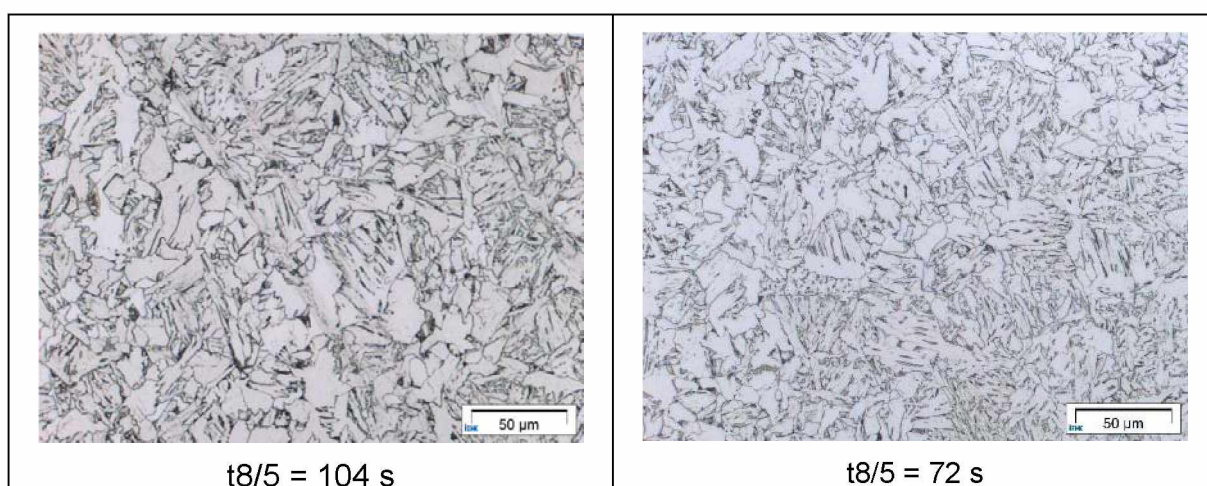


Figura 5.4 – Comparativo de dureza entre as amostras simuladas no dilatômetro da Universidade de Aachen (ensaio dilatômetro – dureza do material de base de 190 HV10) e da SZMF (ensaio Gleeble – dureza do material de base de 177 HV10)

As amostras ensaiadas em simulação Gleeble mostraram microestruturas e durezas bem consistentes com as realizadas por dilatometria (ensaio inicial), como esperado. Isto se ao fato das temperaturas máximas e tempos de permanência na temperatura máxima terem sido iguais em ambos ensaios e da utilização do mesmo aço, o que não ocorreu quando do ensaio robustez (seção 5.1.4). Desta forma fica validado a utilização dos resultados de ensaios mecânicos para elaboração do atlas. Além disso, estes resultados reforçam o caráter de alta robustez da confecção de um atlas para o dado aço.



### 5.2.2 Caracterização de propriedades mecânicas das amostras simuladas na Gleeble

Em cada T8/5 de simulação do ensaio Gleeble, foi ensaiado um grupo de 10 amostras. Oito amostras de cada grupo foram utilizadas para determinar a tenacidade através do ensaio Charpy (entalhe em V). As respectivas curvas de transição dúctil-frágil estão apresentadas no Apêndice I e resumidas na figura 5.5. Além disso, uma amostra por grupo foi avaliada em ensaio universal de tração com seção reduzida, obtendo-se os limites de resistência à tração, escoamento a 0,2 % e alongamentos (figura 5.6). Esta caracterização das propriedades mecânicas está resumida na tabela 5.15.

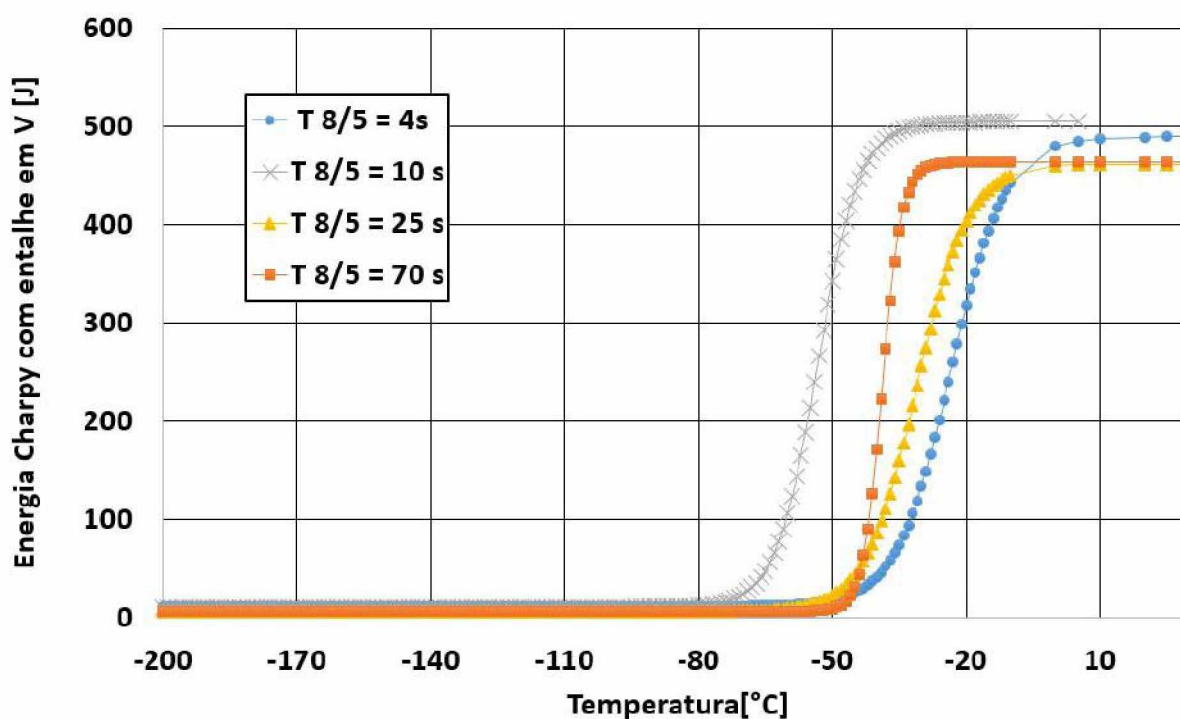


Figura 5.5 – Curvas de tenacidade das amostras do aço (ensaio Gleeble) para os diferentes tempos de resfriamento entre 800 e 500 °C

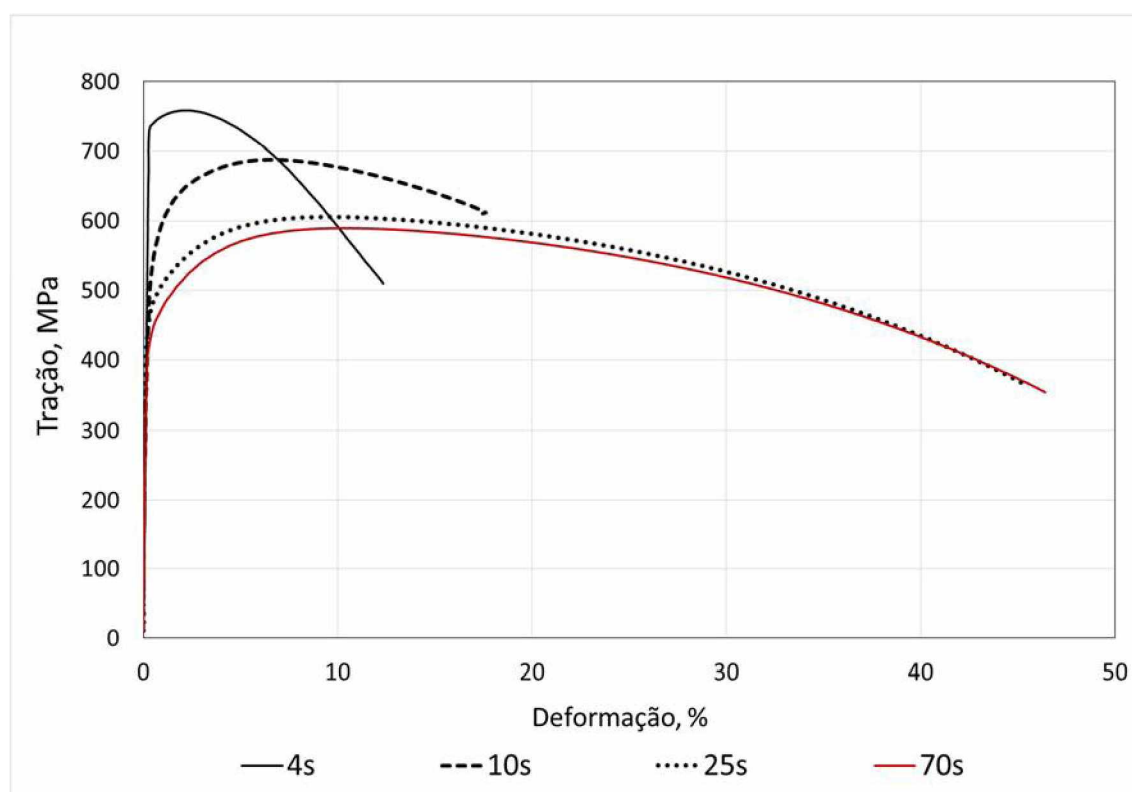


Figura 5.6 – Curvas do ensaio de tração das amostras do aço (ensaio Gleeble) para os diferentes tempos de resfriamento entre 800 e 500 °C

Tabela 5.15 – Caracterização mecânica das amostras do aço (ensaio Gleeble) para os diferentes tempos de resfriamento entre 800 e 500 °C

ID	Limite de escoamento 0,2 % (MPa)	Limite de resistência à tração (MPa)	Alongamento (%)	Charpy V (J à 20 °C)	Transição (°C à 27 J)
0 (original)	-	605*	22,5*	330	- 94
I (t8/5=4 s)	740	759	12,1	490	- 42
II (t8/5=10 s)	529	688	17,0	455	-78
III (t8/5=25 s)	468	606	45,4	445	-63
IV (t8/5=70 s)	434	589	46,3	460	- 59

\* Resultado obtido no certificado do material

Em relação ao ensaio de tenacidade, não foi possível observar diferenças significativas na energia absorvida à 20 °C entre os diferentes tempos de resfriamento (diferentes microestruturas). Porém, foi possível notar que a microestrutura bainítica, obtida com resfriamento t8/5 em 10 s, apresentou a menor temperatura de transição dúctil-frágil à 27 J.

Como a tenacidade do material original foi obtida pelo certificado, não se deve comparar os resultados com estes valores.

A variação da temperatura de transição se dá basicamente por dois fatores: tipo de microestrutura, sendo a martensita a de menor resistência, e o tamanho do grão, explicando a diferença entre as simulações II e III que tem mesma microestrutura bainítica mas diferentes tamanhos de grão.

Em relação à tração, os resultados são como esperados, ou seja, redução do limite de escoamento e crescimento do alongamento, com influência um pouco menor sobre o decréscimo do limite de resistência à tração, quando a velocidade de resfriamento tende a menores valores (microestruturas mais dúcteis). Mesmo assim, independentemente da taxa de resfriamento simulada, pode-se dizer que todos os corpos de prova atenderam ao critério de 550 MPa mínimo de limite de resistência para o aço grau 65.

Assumindo como razoável uma temperatura de transição dúctil-frágil requerida de -50 °C e o limite de resistência à tração mínimo de 550 MPa, os resultados da tabela 5.15, sugerem uma grande janela de soldabilidade para o aço em questão.

## CAPÍTULO VI

### ATLAS DO AÇO SINCRON

#### 6.1 Discussão geral sobre o uso do Atlas de Soldagem

Existem várias formas para um usuário fazer uso de um Atlas de Soldagem de um dado aço, a saber:

- A) O usuário, ainda na fase de elaboração de uma EPS, quer ter garantia da faixa de energia de soldagem que ele pode usar.

Inicialmente, pesquisando no atlas, ele determina a faixa de velocidade de resfriamento tolerável para o dado aço (considerando a microestrutura, a dureza e, quando se aplicar, a tenacidade). Em seguida, ele tem de determinar qual faixa de parâmetros de soldagem (incluindo pré-aquecimento) que ele pode usar no dado processo, para garantir que o resultado da soldagem vai produzir ZACs grosseiras com as mesmas propriedades das amostras do atlas. Para isto, ele deve comparar as velocidades de resfriamento que resultarão com os parâmetros de soldagem com as do atlas, na faixa de velocidade de resfriamento tolerável escolhida. Neste caso, o usuário pode usar duas abordagens para determinar a faixa de parâmetros de soldagem que vai impor a velocidade de resfriamento desejada na região da solda

- Por estimação por cálculos da velocidade de resfriamento

Estas estimativas são em geral feitas por programas computacionais simplistas, não levando em conta (ou levando de forma grosseira) tipo de junta, geometria do componente e o rendimento térmico real do processo. Em alguns casos também não são levados em conta a composição e espessura da chapa.

Naturalmente por esta abordagem a incerteza é maior. Sugere-se deixar uma margem de tolerância maior ao definir a faixa de parâmetros. Consequentemente, o custo da soldagem pode-se torna-se maior pela menor flexibilidade.

- Por estimação pela comparação com as microestruturas do atlas

Neste caso, soldagens deverão ser feitas em amostras do dado aço, cobrindo a faixa de parâmetro que pretende usar. Assim, ao invés de calcular a velocidade de resfriamento, ele vai comparar as microestruturas obtidas com as do atlas. As que forem iguais correspondem às velocidades de resfriamento que a solda produz. Naturalmente, a escolha de geometria da amostra e dos limites dos parâmetros de soldagem devem ser feitos para se obter as velocidades de resfriamentos mais rápidas e mais lentas alcançáveis, nas condições mais similares quanto possível com a do componente.

Naturalmente este método é mais caro e demorado, demandando práticas laboratoriais. Porém, ao se utilizar esta técnica existe a possibilidade de tornar o método menos conservativo e mais econômico.

B) O usuário já tem sua EPS qualificada e quer apenas controlar a qualidade da soldagem.

Neste caso, amostras do componente (por similaridade ou tirada de testemunhos) devem ser retiradas e as microestruturas comparadas com as do Atlas.

## **6.2 Atlas de soldagem do aço Sincron**

A partir do diagrama CCT (seção 5.1.3) e dos resultados de propriedades mecânicas (seção 5.2) foi levantado o atlas para o aço Sincron (ASTM A572 Grau 65) conforme figura 6.1, complementada pelas ilustrações de microestruturas na tabela 6.1.

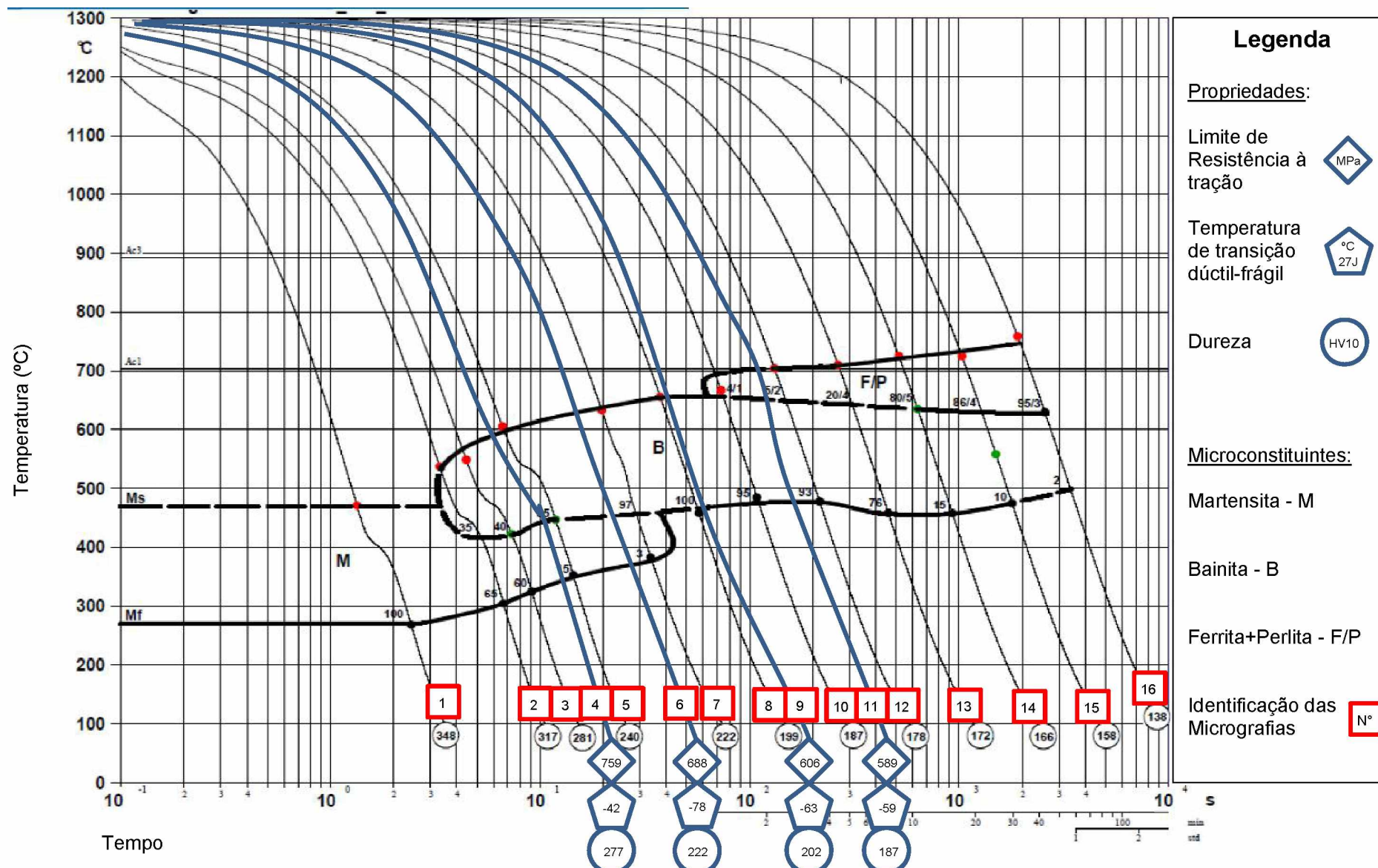

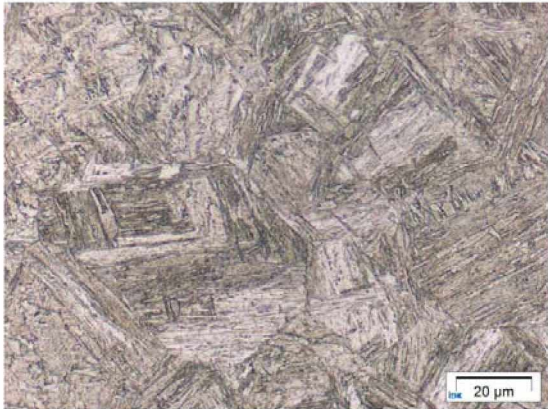

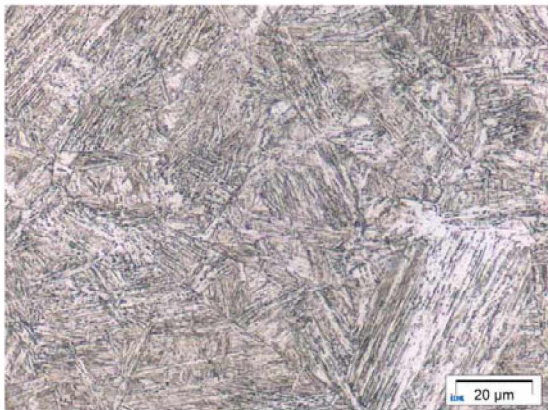







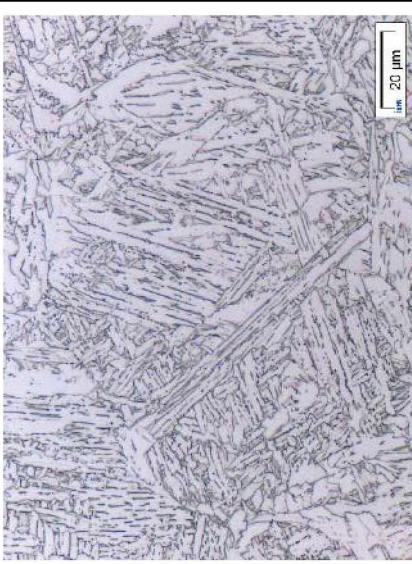

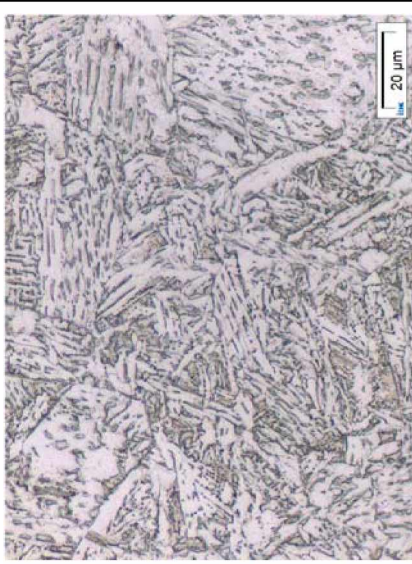







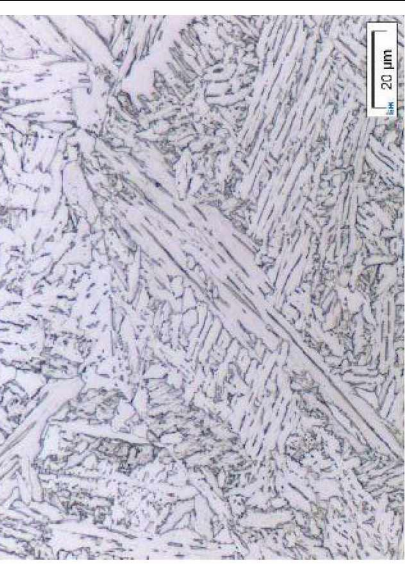

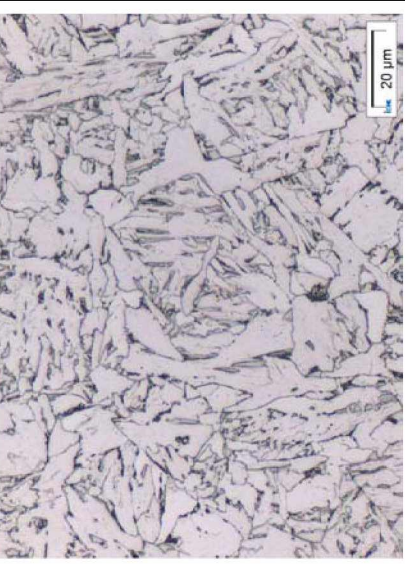
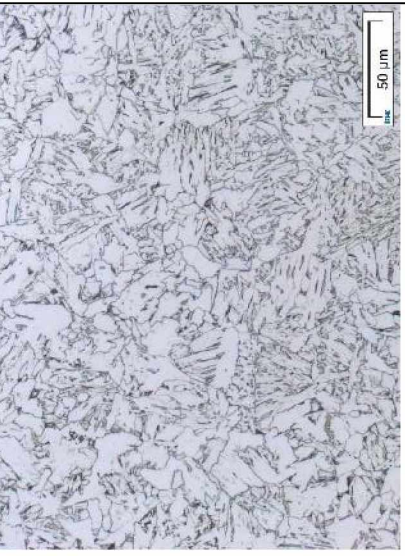
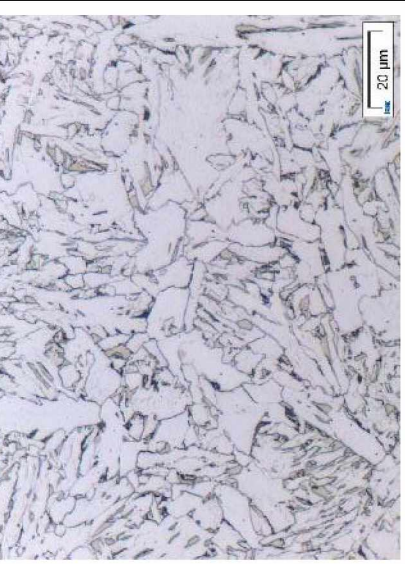
Tabela 6.1 – Micrografias referenciadas no Atlas do aço ASTM A572 grau 65 obtidas por simulação física (dilatometria e Gleeble)

1 (t8/5= 0,6 s)		
2 (t8/5= 1,8 s)		
3 (t8/5= 2,6 s)		





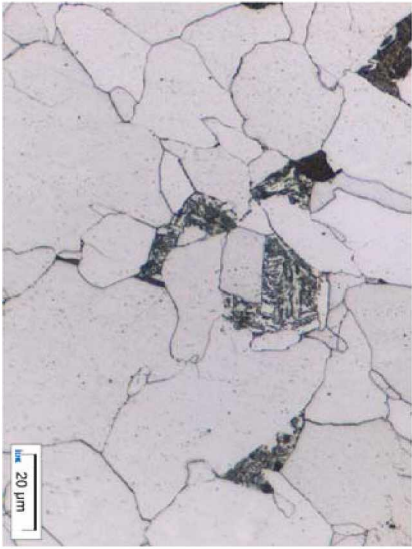
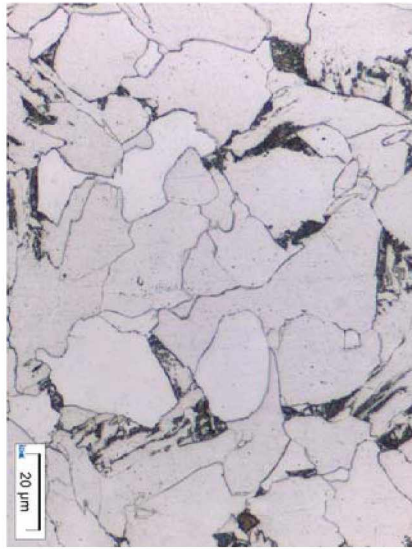
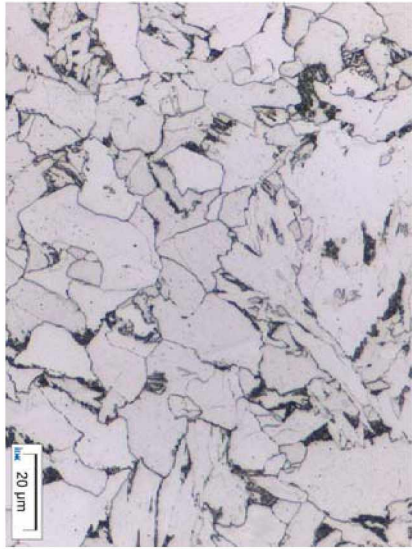



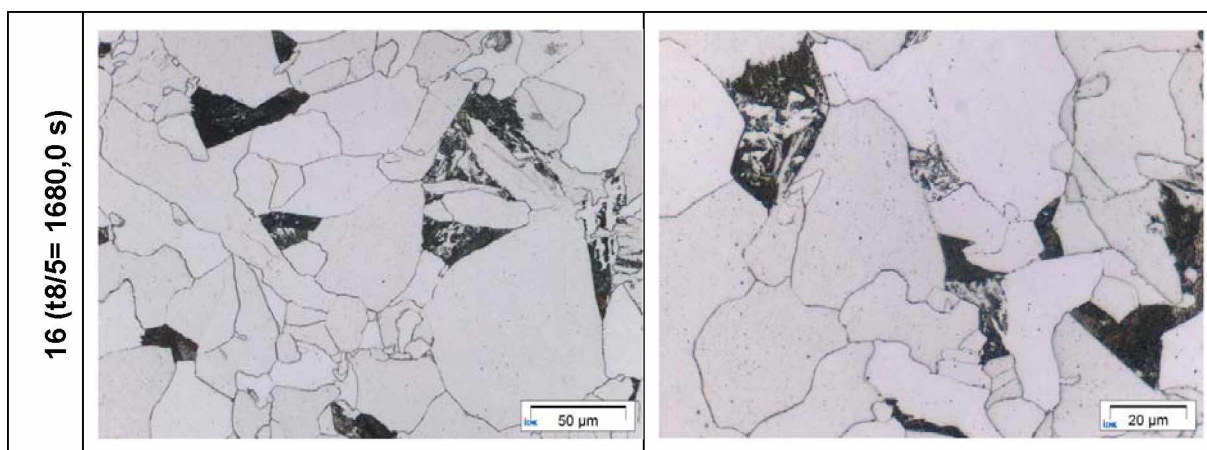
<p>4 (<math>t_{8/5}=4,6\text{ s}</math>)</p>		
<p>5 (<math>t_{8/5}=6,4\text{ s}</math>)</p>		
<p>6 (<math>t_{8/5}=10,8\text{ s}</math>)</p>		
<p>7 (<math>t_{8/5}=13,3\text{ s}</math>)</p>		



<p>8 (t8/5= 26,1 s)</p>		
<p>9 (t8/5= 27,0 s)</p>		
<p>10 (t8/5= 52,0 s)</p>		
<p>11 (t8/5= 72,0 s)</p>		



15 ( $t_{8/5}= 832,0$ s)	14 ( $t_{8/5}= 416,0$ s)	13 ( $t_{8/5}= 208,0$ s)	12 ( $t_{8/5}= 104,0$ s)
			
			



Entende-se, então, que a metodologia para a construção de um atlas através da determinação da curva CCT e das caracterizações mecânica (dureza, tenacidade e resistência à tração) e metalográfica das amostras simuladas seja suficiente para atender as demandas descritos no item 6.1. Entende-se ainda que a caracterização das temperaturas de transformação por dilatômetro é mais fácil e rápida operacionalmente e permite trabalhar com uma faixa mais ampla de velocidades de resfriamento. Porém, não permite a caracterização mecânica e, por isso, é necessário o complemento com ensaio Gleeble.

Reforça-se, porém, que um ponto de grande importância é a padronização dos ciclos térmicos nas simulações, seja por Dilatômetro ou Gleeble, que não é prevista em normas afins. Esta falta de padronização pode causar divergências nos ciclos térmicos, com consequências sobre o tempo de crescimento do grão austenítico e microestrutura final. Este fato foi demonstrado em Scotti et al., 2014.

## CAPÍTULO VII

### COMPARAÇÃO ENTRE AS SIMULAÇÕES E SOLDAS REAIS E ANÁLISE ECONÔMICA

#### 7.1 Introdução

Para se realizar a comparação entre os resultados das simulações físicas e de soldas reais, diversas soldagens foram realizadas com o mesmo aço (Sincron - ASTM A572 Grau 65) usados nas simulações (mas não da mesma corrida e espessuras). A tabela 7.1 apresenta a caracterização das propriedades mecânicas do aço (a respectiva microestrutura típica do metal de base já foi apresentada na seção 5.1.2). A figura 7.1, por sua vez, apresenta a curva de transição dúctil-frágil, obtida por ensaio Charpy (entalhe em V), para o aço em questão.

Tabela 7.1 – Caracterização das propriedades mecânicas do aço ( $t = 25,4$  mm) utilizado em cada placa de teste para soldagem por SAW com pré-aquecimento e sem pré-aquecimento

Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Alongamento (%)	Dureza (HV10)
488	573	23	206

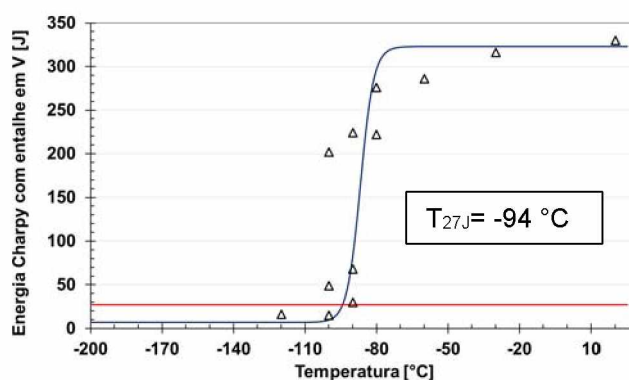


Figura 7.1 – Curva de transição dúctil-frágil de ensaio Charpy (entalhe em V) do aço ( $t = 25,4$  mm) utilizado em cada placa de teste para soldagem por SAW com e sem pré-aquecimento



## 7.2 Estudo de caso 1: Soldagem SAW, posição plana, 25,4 mm, múltiplos passes, com e sem pré-aquecimento

Duas placas de teste do aço de espessura 25,4 mm foram soldadas por arco submerso (mais conhecido pela sigla inglesa SAW – Submerged Arc Welding), em junta de topo, com chanfro em V, posição plana, em 13/11/2014 na empresa CODEME, usando-se um procedimento de soldagem (EPS) qualificado (Anexo IV). As soldagens se diferenciam pela não utilização de pré-aquecimento em uma das placas de teste (a EPS especifica um pré-aquecimento de 80 °C). As placas de teste com e sem pré-aquecimento foram soldadas em condição descrita na tabela 7.2. É importante notar que, durante a regulagem inicial, os soldadores qualificados decidiram aumentar a velocidade de soldagem a valores superiores aos registrados na EPS para obtenção de uma melhor solda. O procedimento sem pré-aquecimento foi realizado com maior energia imposta e resultou em temperaturas interpasses menores, levando a uma suposição de resfriamento mais acelerado.

Tabela 7.2 – Monitoramento das variáveis e energia consumida durante as soldagens do estudo de caso 1

	Número de passes	Temperatura Interpasse máx. (°C)	I (A)	U (V)	Veloc. de soldagem (cm/min)	Energia de soldagem (kJ/cm)
<b>Placa de teste</b>	<b>Com pré-aquecimento de 110 °C</b>					
Passe Raiz	3	170	447 ± 46	30,0 ± 0	25,1 ± 1,7	32,1
Passe Preenchimento	3	240	410 ± 10	29,7 ± 0,6	21,4 ± 2,2	34,0
Passe Acabamento	3	250	400 ± 0	30,0 ± 0	29,9 ± 2,6	24,1
<b>Placa de teste</b>	<b>Sem pré-aquecimento</b>					
Passe Raiz	2	160	440 ± 0	29,5 ± 0,7	24,8 ± 0,4	31,5
Passe Preenchimento	3	210	457 ± 6	29,7 ± 0,6	21,0 ± 1,5	41,4
Passe Acabamento	3	195	433 ± 15	29,7 ± 0,6	27,8 ± 2,1	27,8

### 7.2.1 Caracterização da placa de teste soldada com pré-aquecimento

A figura 7.3 apresenta a macroestrutura da seção transversal da placa de teste soldada com pré-aquecimento, enquanto a figura 7.4 detalha a microestrutura de regiões desta solda.

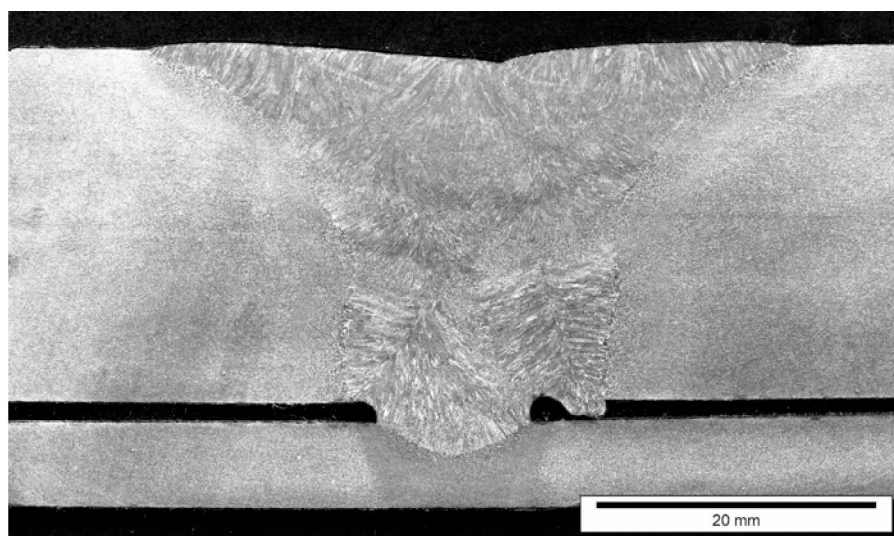


Figura 7.3 – Macrografia da seção transversal da placa de teste de 25,4 mm soldada por SAW com pré-aquecimento

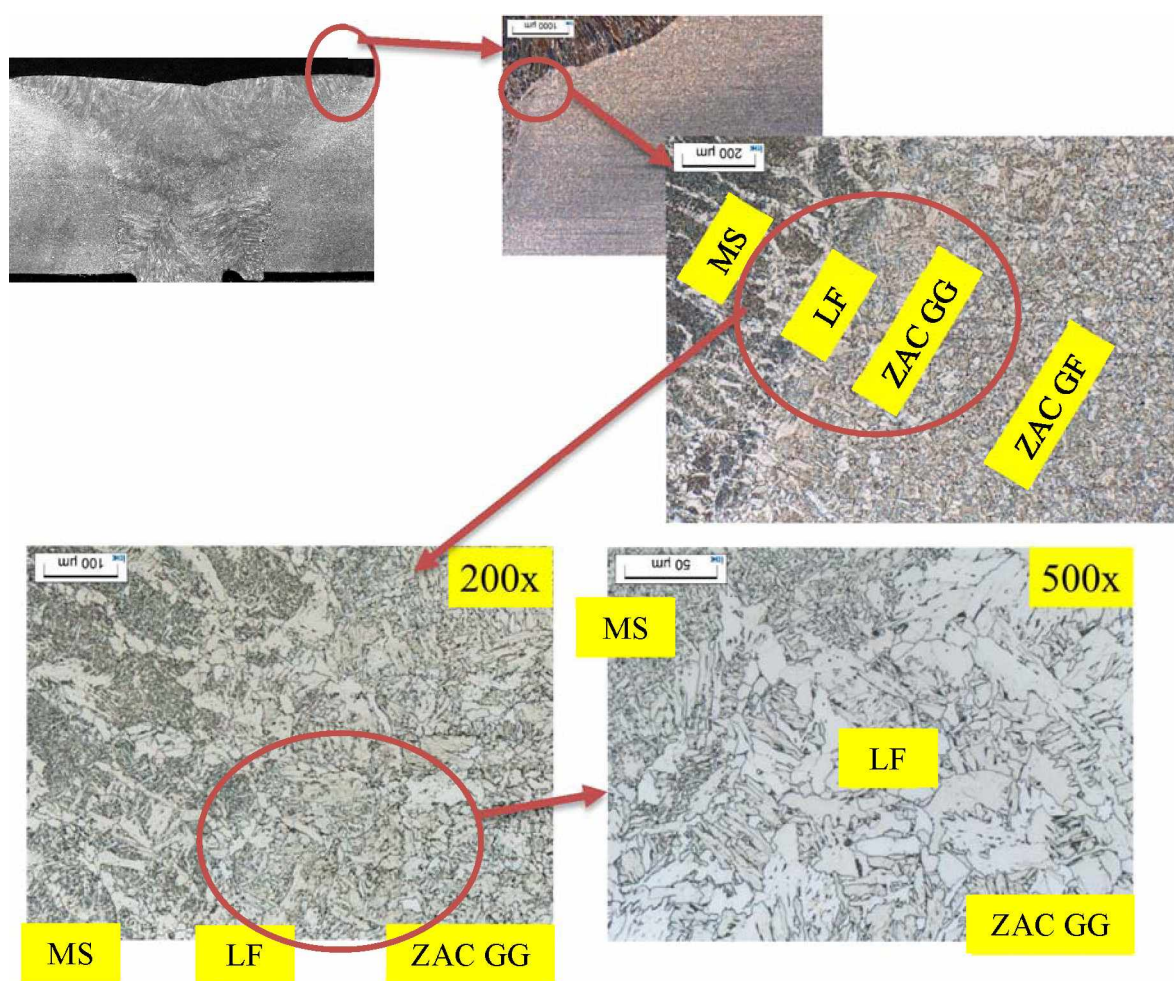


Figura 7.4 – Micrografia da seção transversal da placa de teste de 25,4 mm soldada por SAW com pré-aquecimento (MS – Metal de solda, LF – Linha de Fusão, ZAC GG – Região de crescimento de grãos da ZAC, ZAC GF – Região de refino de grãos da ZAC)



A tabela 7.3 e figuras 7.5 e 7.6 resumam os resultados da qualificação da soldagem da referida placa de teste pela norma AWS D1.1. Por estes dados, a soldagem foi considerada qualificada.

Tabela 7.3 – Propriedades mecânicas de teste de qualificação da solda em placa de teste de 25,4 mm soldada por SAW com pré-aquecimento

Limite de Resistência à Tração (MPa)	Local de ruptura	Tenacidade à temperatura ambiente (J)	Dureza (HV 10)			Dobramento
			MS	ZAC	MB	
580/570	Metal de base	293	247	219	204	Isento de descontinuidade

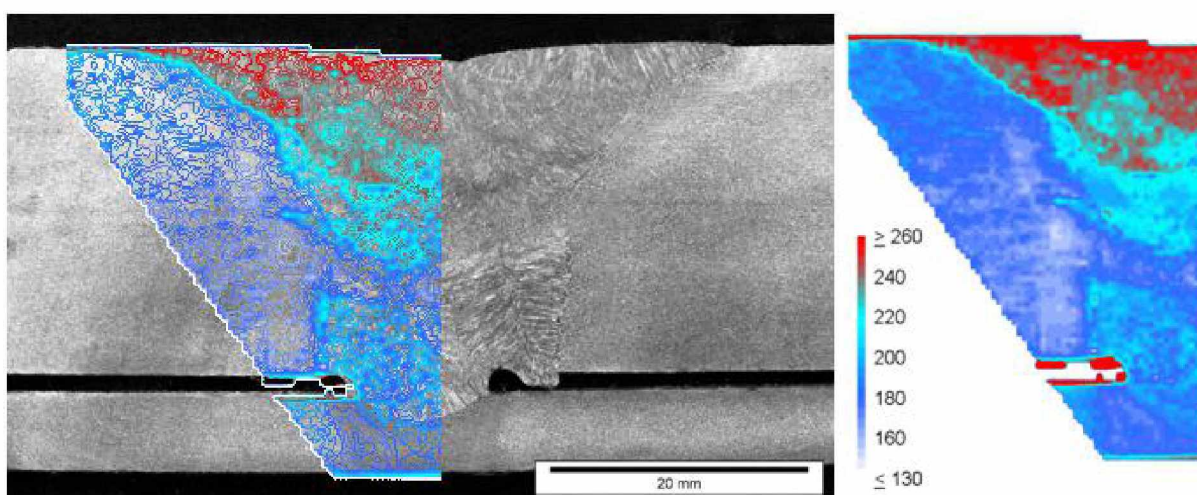


Figura 7.5 – Mapeamento de dureza da seção transversal da placa de teste de 25,4 mm soldada por SAW com pré-aquecimento (HV0,7)

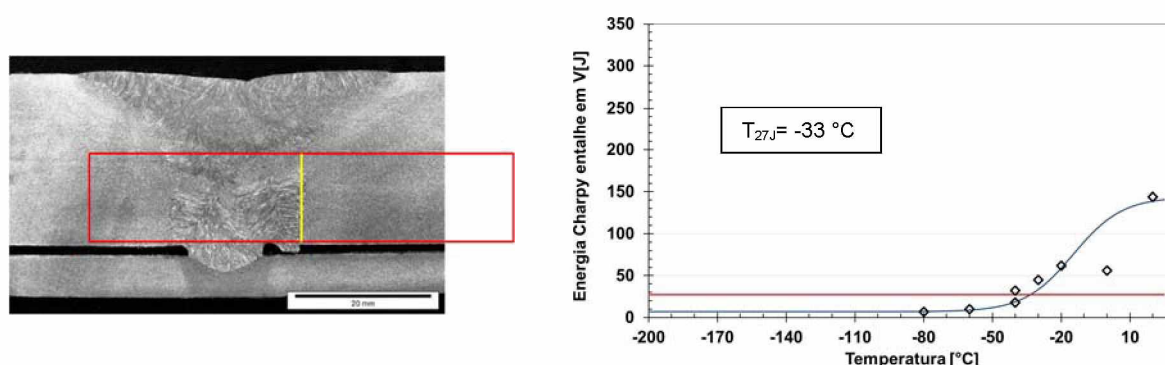


Figura 7.6 – Representação da amostra retirada da placa de teste de 25,4 mm soldada por SAW com pré-aquecimento para ensaio Charpy entalhe em V e respectiva curva de transição dúctil-frágil

### 7.2.2 Caracterização da amostra soldada sem pré-aquecimento

A figura 7.7 apresenta a macroestrutura da seção transversal da placa de teste soldada sem pré-aquecimento, enquanto a figura 7.8 detalha a microestrutura de regiões desta solda.

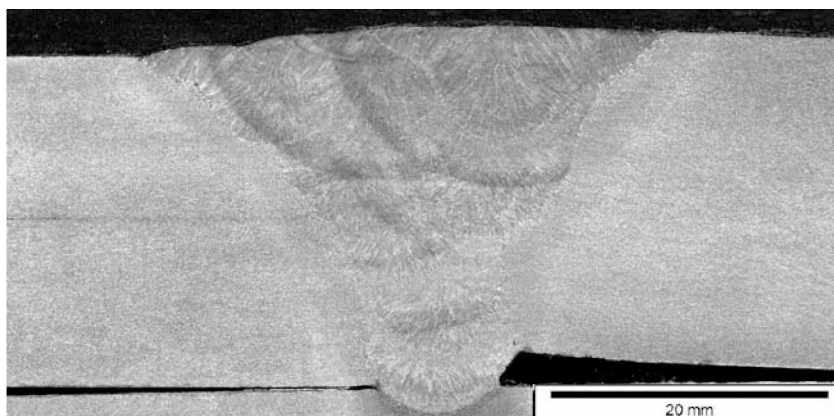


Figura 7.7 – Macrografia da seção transversal da placa de teste de 25,4 mm soldada por SAW sem pré-aquecimento

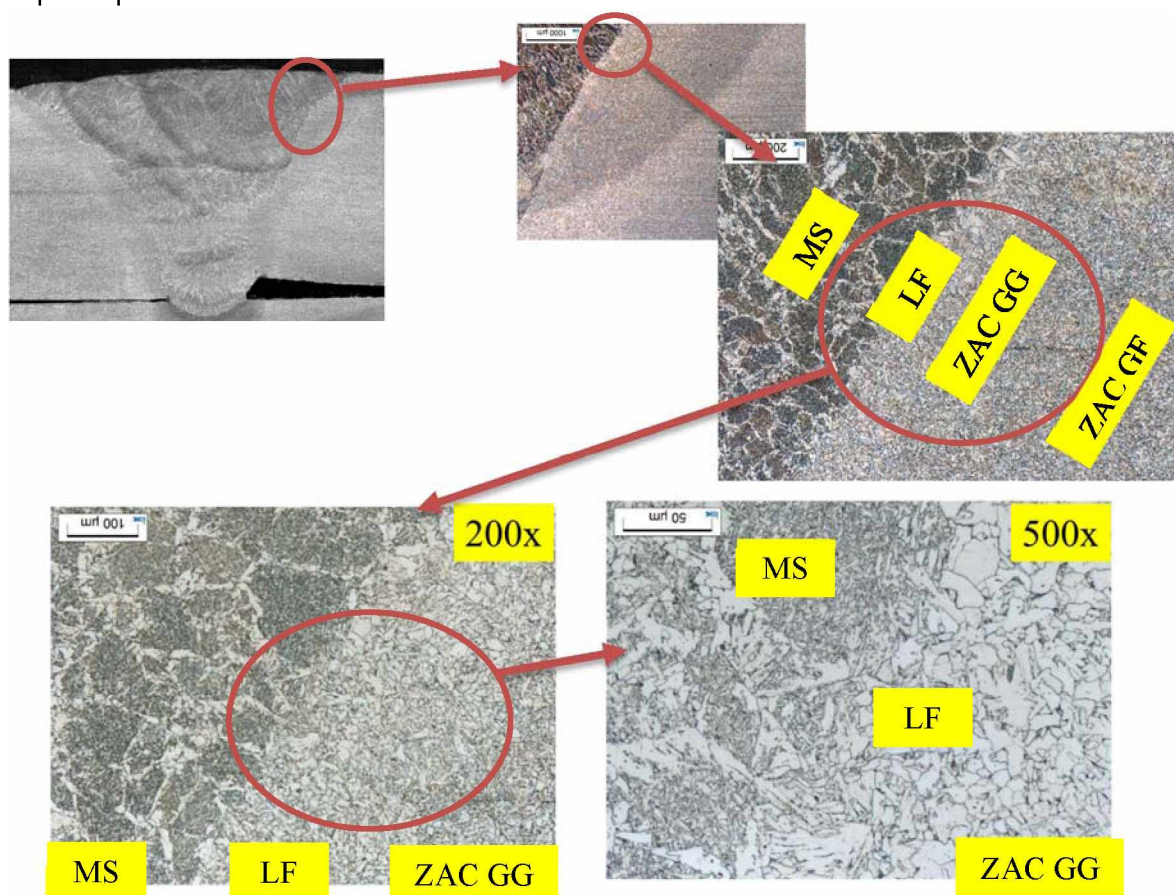


Figura 7.8 – Micrografia da seção transversal da placa de teste de 25,4 mm soldada por SAW sem pré-aquecimento (MS – Metal de solda, LF – Linha de Fusão, ZAC GG – Região de crescimento de grãos da ZAC, ZAC GF – Região de refino de grãos da ZAC)



A tabela 7.4 e figuras 7.9 e 7.10 resumam os resultados da qualificação da soldagem da referida placa de teste pela norma AWS D1.1. Por estes resultados, a soldagem foi considerada qualificada.

Tabela 7.4 – Propriedades mecânicas de teste de qualificação da solda em placa de teste de 25,4 mm soldada por SAW sem pré-aquecimento

Limite de Resistência à Tração (MPa)	Local de ruptura	Tenacidade à temperatura ambiente (J)	Dureza (HV 10)			Dobramento
			MS	ZAC	MB	
563/567	Metal de base	287	237	215	193	Isento de descontinuidade

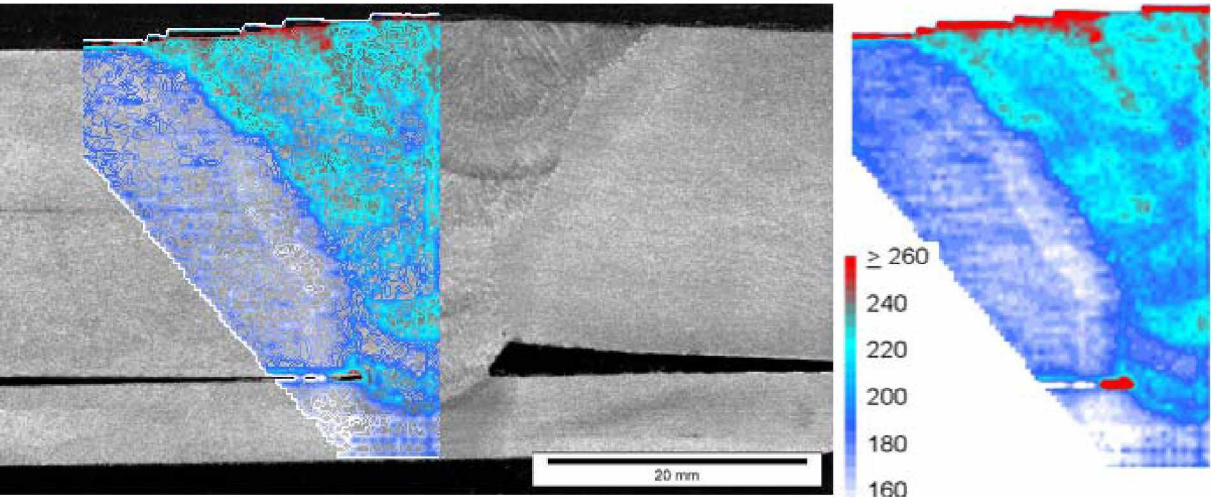


Figura 7.9 – Mapeamento de dureza da seção transversal da placa de teste de 25,4 mm soldada por SAW sem pré-aquecimento (HV0,7)

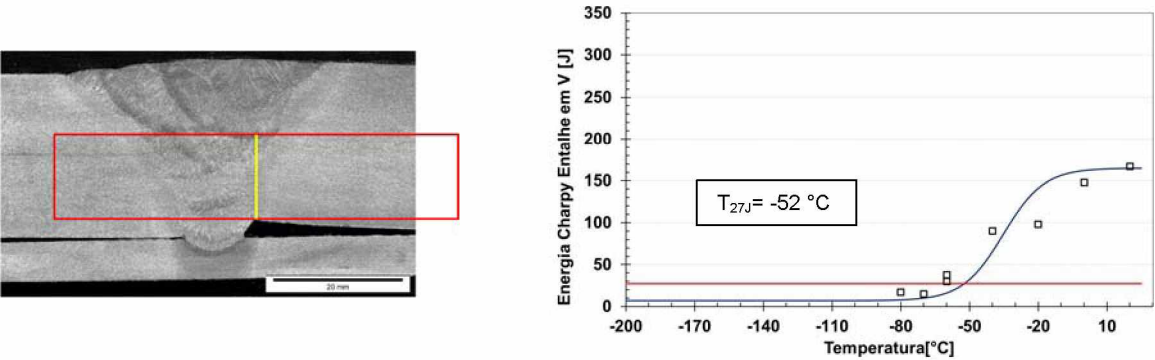


Figura 7.10 – Representação da amostra retirada da placa de teste de 25,4 mm soldada por SAW sem pré-aquecimento para ensaio Charpy entalhe em V e respectiva curva de transição dúctil-frágil

### 7.2.3 Comparação com o atlas

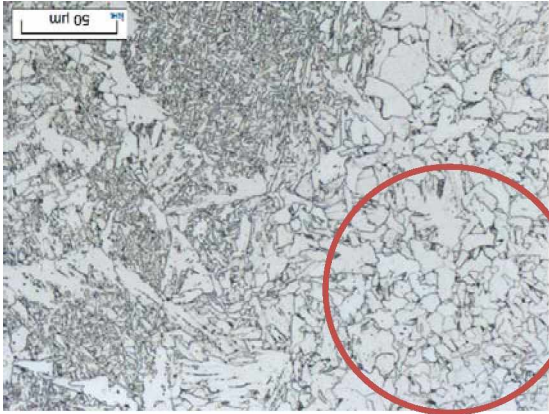
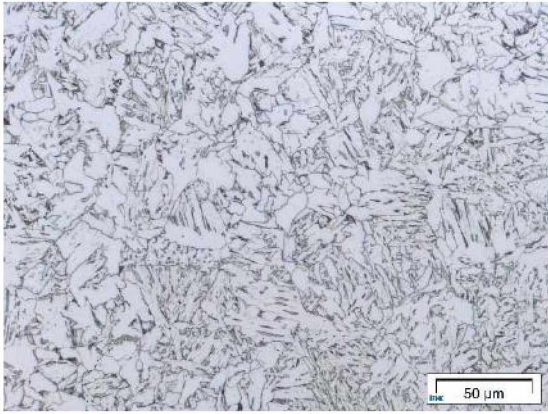

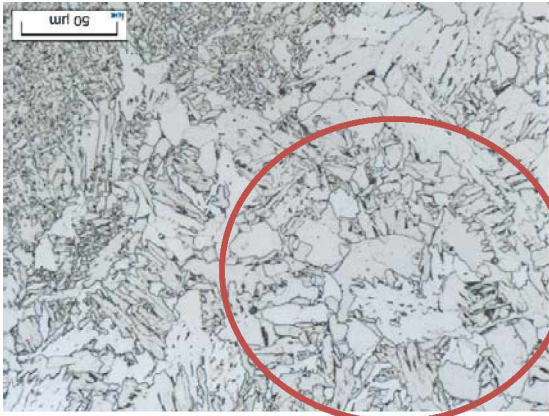
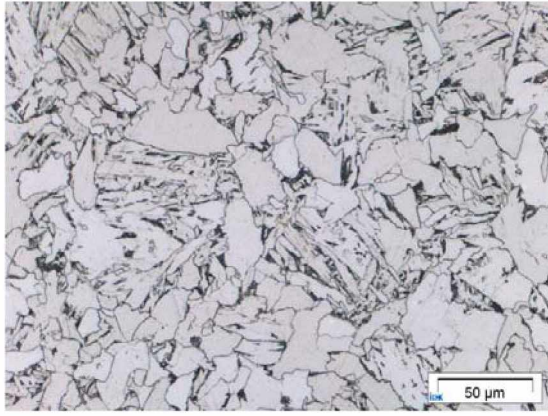
Tomando como referência as microestruturas e durezas da ZAC grosseira do passe de acabamento da soldagem das placas de teste, com pré-aquecimento (figura 7.4) e sem pré-aquecimento (figura 7.8), pode-se dizer que as da solda com pré-aquecimento apresentam granulação mais grosseira do que as da solda sem pré-aquecimento, o que era de se esperar em função de uma potencial menor velocidade de resfriamento na condição com pré-aquecimento. Não há, entretanto, uma diferença significativa nas durezas de ambas amostras, sendo a divergência associada a dificuldade em realizar a medição específica da microestrutura da ZAC GG por macrodureza. A semelhança microestrutural é visível, sendo a diferença de tamanho de grão possivelmente associada aos fatores de tempo de ciclo descritas no item 6.2.

A determinação das velocidades de resfriamento impostas a essas regiões foi feita por comparação com micrografias do atlas. A tabela 7.5 compara a microestrutura e dureza das soldas reais com as microestruturas e durezas previstas no atlas. Verifica-se que as microestruturas são muito semelhantes, tanto com pré-aquecimento como sem pré-aquecimento. Concluiu-se, então, que a soldagem com pré-aquecimento teve resfriamento  $t_{8/5}$  por volta de 200 segundos (microestrutura 13 do atlas). Já na condição de soldagem sem pré-aquecimento, mais em função do tamanho de grão, o resfriamento  $t_{8/5}$  seria entre 70 a 100 segundos (microestrutura 11 e 12 do atlas). Portanto o resfriamento sem pré-aquecimento é mais rápido do que o com pré-aquecimento, como sugerido no parágrafo anterior.

Como análise complementar, verifica-se a influência negativa do procedimento de pré-aquecimento na tenacidade da estrutura, mudando a temperatura de transição dúctil-frágil de  $-52^{\circ}\text{C}$  no procedimento sem pré-aquecimento para  $-33^{\circ}\text{C}$  no procedimento com pré-aquecimento. Este efeito pode ser explicado pelo aumento do volume e tamanho de grão na ZAC GG causado pela redução na taxa de resfriamento que reflete em maior tempo de crescimento de grão austenítico.

Outro detalhe a se descrever é a ocorrência de regiões de reaquecimento nos passes de soldagem que podem diferenciar do atlas que foi simulado com solda de passe único.

Tabela 7.5 – Comparativo de microestruturas do estudo de caso 1 e do Atlas

Região selecionada para comparação da solda real	Atlas
<p data-bbox="373 450 691 488">Sem pré-aquecimento</p>  <p data-bbox="440 925 624 958">HV 10 = 215</p>	<p data-bbox="1011 450 1262 488">Microestrutura 11</p>  <p data-bbox="946 925 1334 958">HV 10 = 187 : <math>t_{8/5} = 72,0</math> s</p> <p data-bbox="1011 976 1262 1014">Microestrutura 12</p>  <p data-bbox="938 1456 1342 1489">HV 10 = 178 : <math>t_{8/5} = 104,0</math> s</p>
<p data-bbox="373 1527 691 1565">Com pré-aquecimento</p>  <p data-bbox="440 2004 624 2038">HV 10 = 219</p>	<p data-bbox="1011 1527 1262 1565">Microestrutura 13</p>  <p data-bbox="938 2004 1342 2038">HV 10 = 172 : <math>t_{8/5} = 208,0</math> s</p>



### 7.2.4 Aplicação de programas computacionais para cálculo de resfriamento t8/5 e temperatura de pré-aquecimento

Como mencionado na metodologia, os programas computacionais são ferramentas importantes para o engenheiro de soldagem e são usados em grande escala, com a devida aprovação pelos responsáveis.

Em primeiro lugar, usou-se o programa computacional livre, referenciado aqui como 1, disponível em <https://www.ewm-group.com/en/practical-knowledge/welding-calculators/cooling-time.html>, para estimar os possíveis tempos de resfriamento no passe de acabamento (com e sem pré-aquecimento) quando realizadas as soldas descritas na tabela 7.2 (telas sequenciais da aplicação do programa ilustradas pelas figuras 7.11 a 7.13). É importante frisar que no terceiro passo ("step") da sequência de entradas de dados do programa existe um erro na descrição da unidade de velocidade de soldagem (estava como m/mm quando deveria ser m/min), fato confirmado ao se alterar o idioma do programa.

**Step 1: Material analysis and calculation of the carbon equivalent**

%	Material analysis 1	Material analysis 2	Carbon equivalent	
C	0.07	0.07	CEV	0.34
Si	0.29	0.29	C equiv.	18.07
Mn	1.48	1.48	PCM	0.16
Cr	0	0	PLS C equiv.	0.10
Ni	0.16	0.16	C equiv.	0.17
Cu	0.14	0.14	CET	0.23
Mo	0	0	CE	0.34
V	0	0	CEN	0.23
Nb	0.02	0.02	CEM	0.17
B	0	0		

Go back Delete values Calculate Step 2

**Step 2: Calculating the preheating temperature**

$$Q = k \cdot \sqrt{t} = k \cdot \frac{\sqrt{t \cdot 60}}{\sqrt{1000}}$$

- The temperatures and heat input may still change after Step 3. The updated values are used for the final calculation.

Welding process		Heat input in kJ/mm	
Submerged arc we		1.23	
<b>Material 1</b>			
Panel thickness in mm	25.4	Minimum preheating temperature in °C	34 °C
<b>Material 2</b>			
Panel thickness in mm	25.4	Minimum preheating temperature in °C	34 °C

Go back Calculate Step 3

Figura 7.11 – Parâmetros comuns na simulação do passe de acabamento do procedimento SAW junta de topo, chanfro em V, com e sem pré-aquecimento (as entradas pelos usuários são a composição química, o processo e a espessura das chapas, sendo os demais valores calculados pelo programa)

Step 3: Calculating the cooling time

$$700 * CET + 160 * \tanh\left(\frac{d}{35}\right) + 62 * HD^{0.35} + 43 * CET * R^{0.35}$$

Arc voltage	Welding current	Welding speed in m/mm	Weld seam factor
29.7	433	0.278	Single-V

Material 1	
Transitional panel thickness	24.21 mm
Cooling time t8/5 in seconds	12.82 s

Material 2	
Transitional panel thickness	24.21 mm
Cooling time t8/5 in seconds	12.82 s

Go back Calculate Conclusion

Conclusion

Material 1	
Because the panel thickness was above the transitional panel thickness, the equation for three-dimensional heat dissipation applied.	
Transitional panel thickness	24.21 mm
Cooling time t8/5 in seconds	12.82 s
Minimum preheating temperature	8 °C
CET	0.23

Material 2	
Because the panel thickness was above the transitional panel thickness, the equation for three-dimensional heat dissipation applied.	
Transitional panel thickness	24.21 mm
Cooling time t8/5 in seconds	12.82 s
Minimum preheating temperature	8 °C
CET	0.23

Go back Start

Figura 7.12 – Parâmetros e resultado de simulação do passe de acabamento do procedimento SAW junta de topo, chanfro em V, sem pré-aquecimento (as entradas pelos usuários são os parâmetros de soldagem, sendo os demais valores calculados pelo programa)

Step 3: Calculating the cooling time

$$700 * CET + 160 * \tanh\left(\frac{d}{35}\right) + 62 * HD^{0.35} + 43 * CET * R^{0.35}$$

Arc voltage	Welding current	Welding speed in m/mm	Weld seam factor
30	400	0.299	Single-V

Material 1	
Transitional panel thickness	22.66 mm
Cooling time t8/5 in seconds	11.31 s

Material 2	
Transitional panel thickness	22.66 mm
Cooling time t8/5 in seconds	11.31 s

Go back Calculate Conclusion

Conclusion

Material 1	
Because the panel thickness was above the transitional panel thickness, the equation for three-dimensional heat dissipation applied.	
Transitional panel thickness	22.66 mm
Cooling time t8/5 in seconds	11.31 s
Minimum preheating temperature	15 °C
CET	0.23

Material 2	
Because the panel thickness was above the transitional panel thickness, the equation for three-dimensional heat dissipation applied.	
Transitional panel thickness	22.66 mm
Cooling time t8/5 in seconds	11.31 s
Minimum preheating temperature	15 °C
CET	0.23

Go back Start

Figura 7.13 – Parâmetros e resultado de simulação do passe de acabamento do procedimento SAW junta de topo, chanfro em V, com pré-aquecimento (as entradas pelos usuários são os parâmetros de soldagem, sendo os demais valores calculados pelo programa)

Posteriormente, foi realizada a comparação com um segundo programa computacional livre (referenciado aqui como 2), disponível em <http://homepage3.nifty.com/yurioka/classE/NewP02E.html>. Este programa prevê a história térmica suportada pelo material na linha de fusão após soldagem (figuras 7.14 e 7.15). Os mesmos parâmetros de soldagem dos passes de acabamento da Tabela 7.2 foram aplicados nessa simulação.



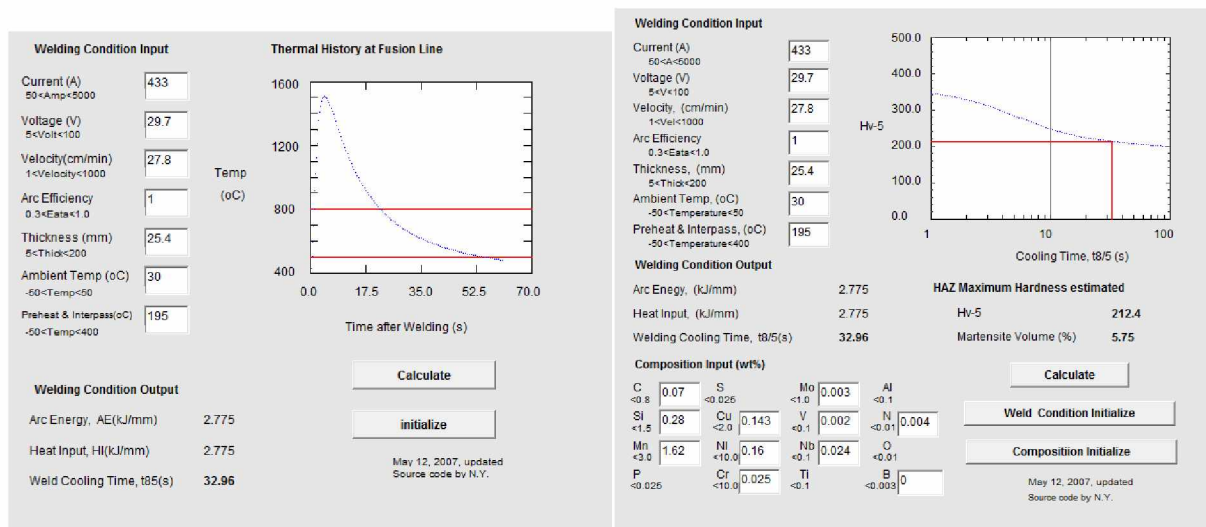


Figura 7.14 – Parâmetros e resultado de simulação da história térmica do passe de acabamento do procedimento SAW junta de topo, chanfro em V, sem pré-aquecimento (os campos para entrada de dados estão destacados como caixas)

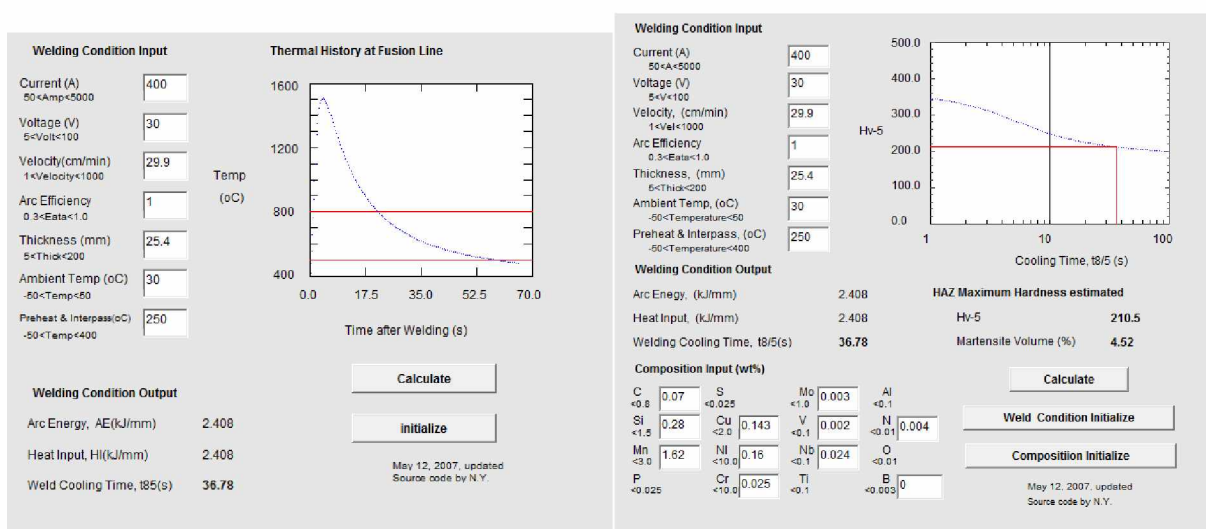


Figura 7.15 – Parâmetros e resultado de simulação da história térmica da linha de fusão do passe de acabamento do procedimento SAW junta de topo, chanfro em V, com pré-aquecimento (os campos para entrada de dados estão destacados como caixas)

Por fim, foi avaliado a necessidade de pré-aquecimento através do uso do programa computacional livre disponível em <http://www.gowelding.com/weld/preheat/preheatcalc.htm> (referenciado como programa 3), utilizando a maior energia permitida na EPS descrita no anexo IV (telas da aplicação do programa ilustradas pela figura 7.16) e o pior caso de exposição a hidrogênio (escala C).

**Pre-heat Calculator**

Pre-Heat Calculator to EN1011 Part 2 - Non Alloyed And Low Alloy Steels.

[Information on how to use this page](#)

- Heat Input**  
 Enter Arc Energy KJ/mm  OR   
 Select Welding Process   
 Heat Input KJ/mm =  Note, this box is not for data input.
- Carbon Equivalent**  
 Enter Carbon Equivalent  OR
- Hydrogen Scale**  
 Select Hydrogen Scale
- Combined Thickness**  
 Enter Combined Thickness mm  Note Thickness must be 2 x T for a butt weld
- Calculate Pre-Heat**  
 Min Pre-Heat Temperature=  °C

Figura 7.16 – Cálculo de pré-aquecimento mínimo para procedimento SAW junta de topo (as entradas pelos usuários são a energia do arco, o processo de soldagem, o carbono equivalente, o H<sub>2</sub> difusível e a espessura, sendo o calor imposto e a temperatura de pré-aquecimento as respostas calculadas)

Como demonstrado pelas figuras 7.11 a 7.13, o cálculo do programa computacional 1 apresentou valores de t<sub>8/5</sub> de 11 s (com pré-aquecimento) e 13,5 s (sem pré-aquecimento). Esclarece-se que por este programa não se encontrou como entrar com a temperatura de pré-aquecimento. As diferenças encontradas em termos de t<sub>8/5</sub> se devem a pequenas diferenças nos parâmetros de soldagem quando das soldagens com e sem pré-aquecimento. O programa computacional 2 (figuras 7.14 e 7.15), utilizando como temperatura de pré-aquecimento/interpasse para o passe de acabamento a temperatura de interpasse máxima descrita na tabela 7.2, portanto mais similar com o praticado na solda real, apresentou resultados de t<sub>8/5</sub> de 33 s (sem pré-aquecimento) e 37 s (com pré-aquecimento).

Comparando estas previsões com os resultados obtidos pela aplicação da metodologia deste trabalho (seção 7.2.3), que foi entre 70 a 100 s (sem pré-aquecimento) e 200 s (com pré-aquecimento), verifica-se uma grande discrepância. Uma velocidade de resfriamento calculada tanto com o programa computacional 1 quanto o 2, levaria (ver diagrama CCT do aço na seção 5.1.3) a microconstituintes majoritariamente bainíticos, não visualizados na

solda real (que foi basicamente Ferrítico com pequenas placas bainíticas e ilhas de perlitas). O próprio programa 2 prevê cerca de 5% de martensita, coerente com um resfriamento mais rápido previsto, apesar de prever a mesma faixa de dureza da ZAC. Além disto, ao se aplicar a velocidade de resfriamento prevista pelo programa 2 (de 33 a 37 s) no diagrama CCT do atlas (curva de resfriamento da micrografia 9), a microestrutura resultante estaria mais próxima do previsto. Isto sugere que o programa 2 erra neste caso no cálculo da velocidade de resfriamento (a eficiência de arco poderia ser uma fonte de erro).

Entretanto, mesmo considerando as inexatidões dos programas (programa 1 maior do que 2) em termos de tempos de resfriamento, tanto o programa 1 como o programa 3 concluem pela não necessidade de pré-aquecimento. Desta forma, por todas as análises realizadas não se encontrou uma base para o uso do pré-aquecimento no procedimento descrito na EPS da empresa CODEME.

### **7.3 Estudo de caso 2: Solda SAW, posição T, t = 25,4 mm e 12,5 mm, múltiplos passes, sem pré-aquecimento, soldagem de aço ASTM A572 Grau 65 com ASTM A572 Grau 50**

#### **7.3.1 Caracterização da placa de teste soldada**

Uma placa de teste utilizando dois aços dissimilares, um com espessura 25,4 mm do aço Sincron (ASTM A572 Grau 65) caracterizado na seção 5.2, e um com espessura de 12,5 mm ASTM A572 Grau 50, foi soldada por arco submerso, com junta T, chanfro semi V, posição filete horizontal em junta de topo, na empresa CODEME, usando-se um procedimento de soldagem (EPS) qualificado (Anexo IV) que tem energia de soldagem inferior ao apresentado no estudo de caso 1 e sem necessidade de pré-aquecimento. A caracterização macro e microestrutural está ilustrada na figura 7.17, o mapeamento de dureza está na figura 7.18 e as linhas de dureza na figura 7.18.

A qualificação da soldagem da referida placa de teste pela norma AWS D1.1 é feita complementando os resultados do estudo de caso 1 pelas macrografias da junta em T. Pelo resultado da figura 7.17, a soldagem foi considerada qualificada.



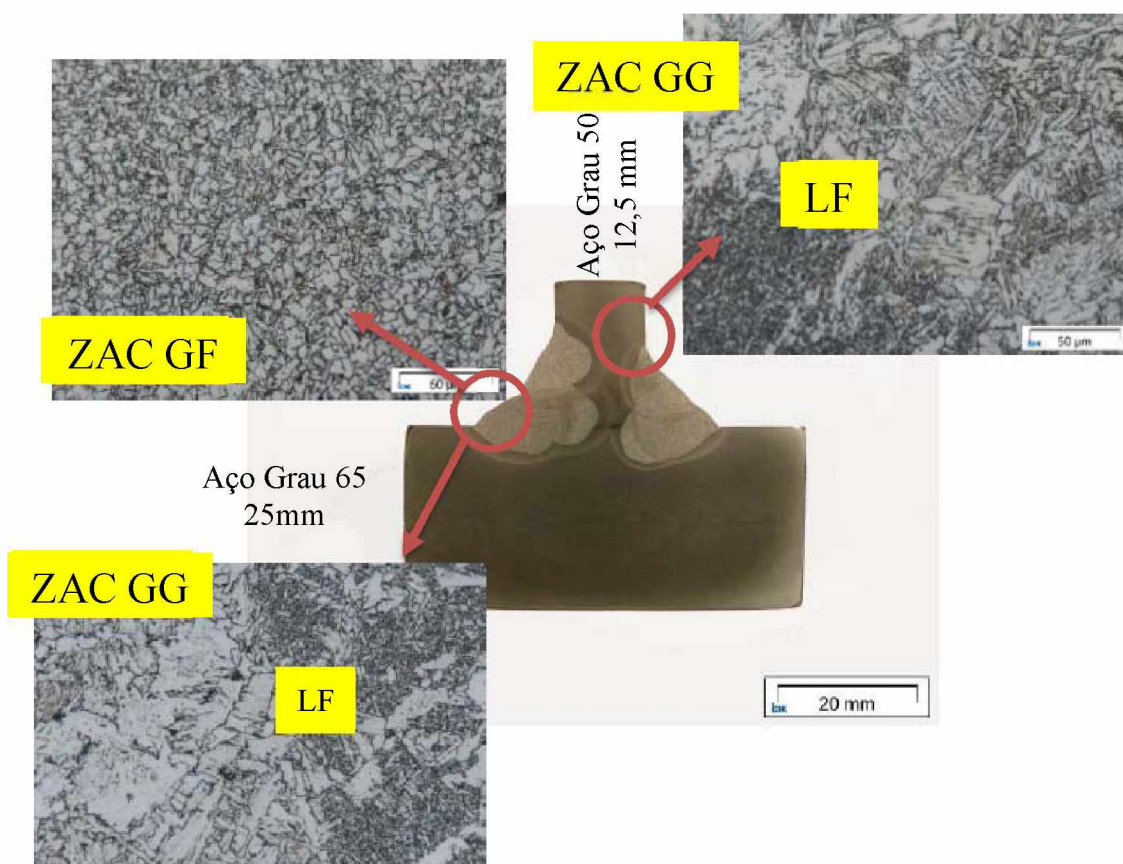


Figura 7.17 – Macro e micrografia da seção transversal da placa de teste soldada por SAW sem pré-aquecimento, junta em T, chapa de espessura de 25,4 mm em aço ASTM A572 Grau 65 e chapa de 12,5 mm de espessura em aço ASTM A572 Grau 50 (LF – Linha de Fusão, ZAC GG – Região de crescimento de grãos da ZAC, ZAC GF – Região de refino de grãos da ZAC)

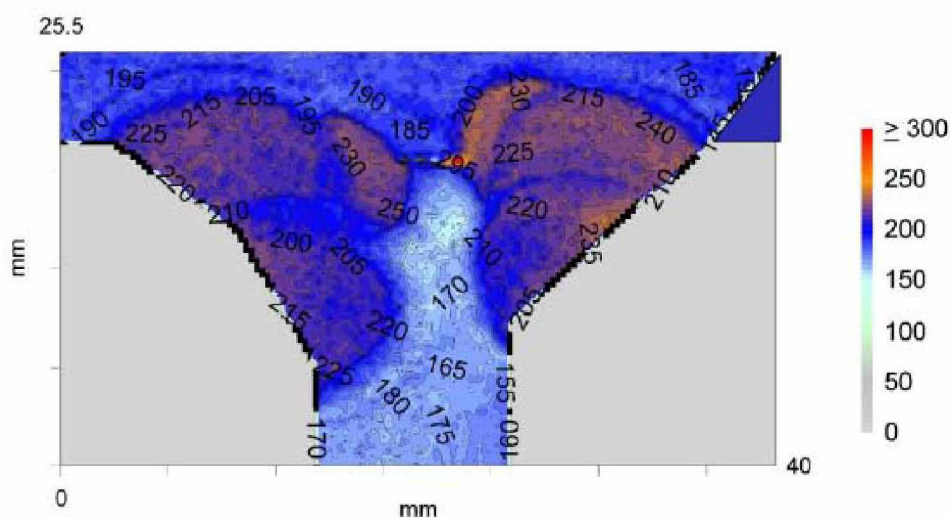


Figura 7.18 – Mapeamento de dureza da seção transversal da placa de teste soldada por SAW sem pré-aquecimento, junta em T, chapa de espessura de 25,4 mm em aço ASTM A572 Grau 65 e chapa de 12,5 mm de espessura em aço ASTM A572 Grau 50 (HV0,7)

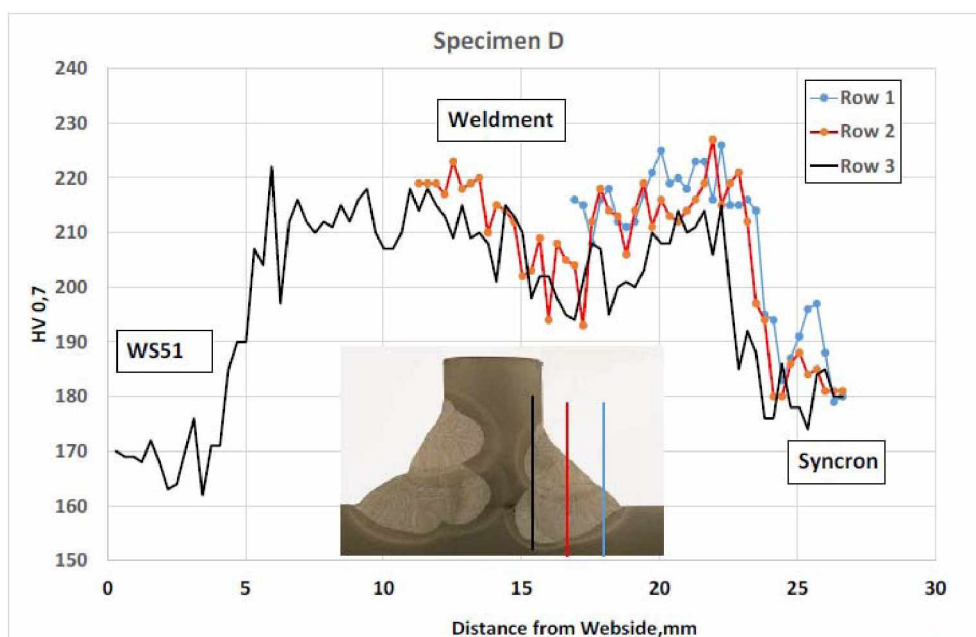

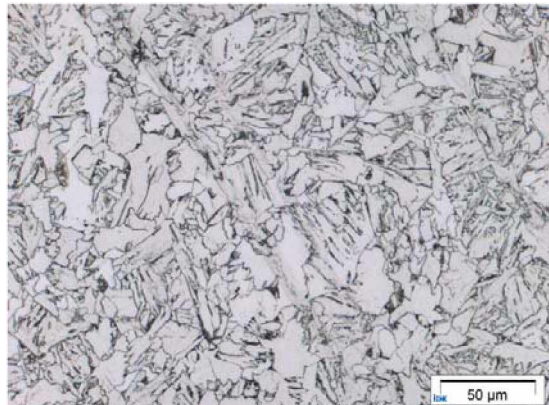


Figura 7.19 – Linhas de dureza da seção transversal da placa de teste soldada por SAW sem pré-aquecimento, junta em T, chapa de espessura de 25,4 mm em aço ASTM A572 Grau 65 e chapa de 12,5 mm de espessura em aço ASTM A572 Grau 50

### 7.3.2 Comparação com resultados esperados no atlas

Tomando como referência a ZAC grosseira do passe de acabamento da soldagem da placa de teste (figura 7.18) do aço Sincron, a determinação das velocidades de resfriamento impostas a esta região foi feita por comparação com o atlas. A tabela 7.5 compara a microestrutura e dureza das soldas reais com as microestruturas e durezas previstas no atlas.

Tabela 7.6 – Comparativo de microestruturas do estudo de caso 2 e do Atlas

Região selecionada para comparação da solda real	Atlas
 <p>ZAC GG</p> <p>HV 10 = 210</p>	<p>Microestrutura 12</p>  <p>HV 10 = 178 : t8/5 = 104,0 s</p>

Concluiu-se, então, que a soldagem teve resfriamento  $t_8/5$  por volta de 100 segundos (microestrutura 12 do atlas) demonstrando grande proximidade entre as microestruturas e a microestrutura sem pré-aquecimento do estudo de caso 1. As durezas mantem o mesmo desvio apresentado no estudo de caso 1.

### 7.3.3 Aplicação de programas computacionais para cálculo de resfriamento $t_8/5$ e temperatura de pré-aquecimento

Seguindo a mesma metodologia descrita no estudo de caso 1, usou-se os programas computacionais livres 1 e 2 para estimar os possíveis tempos de resfriamento no passe de acabamento, como ilustram as figuras 7.20 a 7.22. Os parâmetros de entrada foram tirados do Anexo IV.

**Step 1: Material analysis and calculation of the carbon equivalent**

%	Material analysis 1	Material analysis 2	Carbon equivalent	
C	0.07	0.16	CEV	0.34
Si	0.29	0.19	C equiv.	18.07
Mn	1.48	1.42	PCM	0.16
Cr	0	0.02	PLS C equiv.	0.10
Ni	0.16	0.01	C equiv.	0.17
Cu	0.14	0.02	CET	0.23
Mo	0	0	CE	0.34
V	0	0.005	CEN	0.23
Nb	0.02	0.047	CEM	0.17
B	0	0.0002		0.24

Go back Delete values Calculate Step 2

**Step 2: Calculating the preheating temperature**

$$Q = k \cdot \sqrt{E} = k \cdot \frac{\sqrt{t \cdot H}}{\sqrt{1000}}$$

The temperatures and heat input may still change after Step 3. The updated values are used for the final calculation.

Welding process		Heat input in kJ/mm	
Submerged arc wel		1.23	
<b>Material 1</b>			
Panel thickness in mm	25.4	Minimum preheating temperature in °C	34 °C
<b>Material 2</b>			
Panel thickness in mm	12.5	Minimum preheating temperature in °C	47 °C

Go back Calculate Step 3

Figura 7.20 – Parâmetros e resultado de simulação do passe de acabamento do procedimento SAW junta em T aço dissimilar (grau 50 e grau 65), chanfro em meio V, sem pré-aquecimento, (as entradas pelos usuários são a composição química, o processo e a espessura das chapas, sendo os demais valores calculados pelo programa).

**Step 3: Calculating the cooling time**

$$700 * CET + 160 * \tanh\left(\frac{d}{35}\right) + 62 * t_{8/5}^{0.35} + 153 * CET - 31 * Q_{eff}^{0.38}$$

Arc voltage	Welding current	Welding speed in m/mm	Weld seam factor
32	435	0.75	Fillet we
<b>Material 1</b>			
Transitional panel thickness		15.75 mm	
Cooling time $t_8/5$ in seconds		4.2 s	
<b>Material 2</b>			
Transitional panel thickness		15.89 mm	
Cooling time $t_8/5$ in seconds		0.08 s	

Go back Calculate Conclusion

**Conclusion**

Material 1	
Because the panel thickness was above the transitional panel thickness, the equation for three-dimensional heat dissipation applied.	
Transitional panel thickness	15.75 mm
Cooling time $t_8/5$ in seconds	4.2 s
Minimum preheating temperature	43 °C
CET	0.23
<b>Material 2</b>	
Because the panel thickness was below the transitional panel thickness, the equation for two-dimensional heat dissipation applied.	
Transitional panel thickness	15.89 mm
Cooling time $t_8/5$ in seconds	0.08 s
Minimum preheating temperature	54 °C
CET	0.30

Go back Start

Figura 7.21 – Parâmetros e resultado de simulação do passe de acabamento do procedimento SAW junta T dissimilar (grau 50 e grau 65), chanfro em meio V, sem pré-aquecimento (as entradas pelos usuários são os parâmetros de soldagem, sendo os demais valores calculados pelo programa)



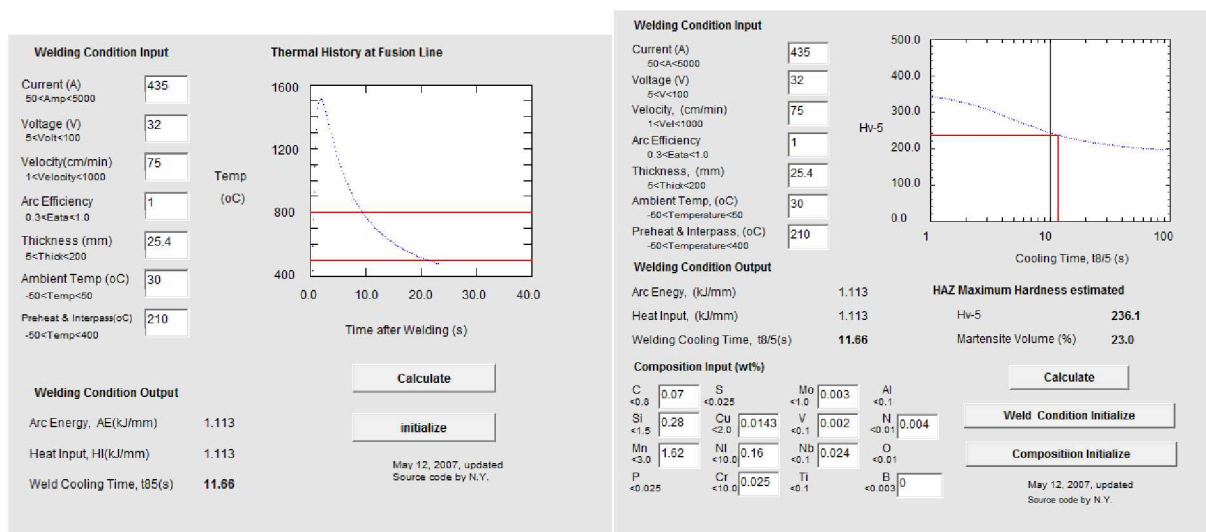


Figura 7.22 –Parâmetros e resultado de simulação da história térmica da linha de fusão do passe de acabamento do procedimento SAW, aço grau 65, junta T, chanfro em meio V, sem pré-aquecimento (os campos para entrada de dados estão destacados como caixas)

As figuras 7.23 a 7.24 demonstram a utilização do programa livre 3 de forma a calcular a necessidade de pré-aquecimento com os parâmetros de entrada do Anexo IV.

**Pre-heat Calculator**

Pre-Heat Calculator to EN1011 Part 2 - Non Alloyed And Low Alloy Steels.

[Information on how to use this page](#)

- Heat Input**

Enter Arc Energy KJ/mm: 1.2 OR Calculate

Select Welding Process: Submerged Arc Welding

Heat Input KJ/mm = 1.2 *Note, this box is not for data input.*
- Carbon Equivalent**

Enter Carbon Equivalent: 0.34 OR Calculate
- Hydrogen Scale**

Select Hydrogen Scale: C (MMA Basic Electrodes + MIG/MAG) 5 - 10ml/100g
- Combined Thickness**

Enter Combined Thickness mm: 50 *Note Thickness must be 2 x T for a butt weld*
- Calculate Pre-Heat**

Calculate Pre-Heat

Min Pre-Heat Temperature= 0 °C

Figura 7.23 – Cálculo de pré-aquecimento mínimo para procedimento SAW junta T, aço grau 65 (as entradas pelos usuários são a energia do arco, o processo de soldagem, o carbono equivalente, o H<sub>2</sub> difusível e a espessura, sendo o calor imposto e a temperatura de pré-aquecimento as respostas calculadas)



**Pre-heat Calculator**

Pre-Heat Calculator to EN1011 Part 2 - Non Alloyed And Low Alloy Steels.

[Information on how to use this page](#)

- Heat Input**  
 Enter Arc Energy KJ/mm  OR   
 Select Welding Process   
 Heat Input KJ/mm =  Note, this box is not for data input.
- Carbon Equivalent**  
 Enter Carbon Equivalent  x OR
- Hydrogen Scale**  
 Select Hydrogen Scale
- Combined Thickness**  
 Enter Combined Thickness mm  Note Thickness must be 2 x T for a butt weld
- Calculate Pre-Heat**  
 Min Pre-Heat Temperature=  °C

Figura 7.24 – Cálculo de pré-aquecimento mínimo para procedimento SAW junta T, aço grau 50 (as entradas pelos usuários são a energia do arco, o processo de soldagem, o carbono equivalente, o  $H_2$  difusível e a espessura, sendo o calor imposto e a temperatura de pré-aquecimento as respostas calculadas)

Como demonstrado pelas figuras 7.20 e 7.21, o cálculo do programa computacional 1 apresentou valores de  $t_{8/5}$  de 4,2 s no aço grau 65. O programa computacional 2 (figura 7.22), utilizando como temperatura de pré-aquecimento/interpasse para o passe de acabamento a temperatura de interpasse máxima descrito no Anexo IV, portanto mais similar com o praticado na solda real, apresentou resultados de  $t_{8/5}$  de 11,7 s.

Comparando estas previsões com os resultados obtidos pela aplicação da metodologia deste trabalho (seção 7.3.2), que foi de 100 s, verifica-se uma grande discrepância. Uma velocidade de resfriamento calculada com o programa computacional 1, levaria (ver diagrama CCT do aço na seção 5.1.3) a microconstituintes bainíticos e martensíticos, em relação ao tempo do programa computacional 2 os microconstituintes seriam majoritariamente bainíticos, não visualizados na solda real (que foi basicamente Ferrítico com pequenas placas bainíticas e ilhas de perlitas). O próprio programa 2 prevê cerca de 23% de martensita, coerente com um resfriamento mais rápido previsto. Confirmando as inexatidões descritas no estudo de caso 1.

Entretanto, mesmo considerando as inexatidões dos programas (programa 1 maior do que 2) em termos de tempos de resfriamento, tanto o programa 1 como o programa 3 concluem pela necessidade de pré-aquecimento de cerca de 50°C devido ao aço grau 50 que tem carbono equivalente mais elevado. Neste caso o uso do pré-aquecimento não está

descrito no procedimento descrito na EPS da empresa CODEME e não aparenta ser necessário pelos testes realizados sem pré-aquecimento.

#### 7.4 Estudo de caso 3: Solda FCAW, posição plana, $t = 25,4$ mm, múltiplos passes, sem pré-aquecimento, soldagem de aço ASTM A572 Grau 65 com ASTM A572 Grau 50

##### 7.4.1 Caracterização da placa de teste soldada

Uma placa de teste utilizando dois aços dissimilares, um com espessura 25,4 mm do aço Sincron (ASTM A572 Grau 65) caracterizado na seção 5.2, e um com espessura de 25,4 mm ASTM A572 Grau 50, foi soldada por arame tubular, em junta de topo, com chanfro em V, posição plana, na empresa CODEME, usando-se um procedimento de soldagem (EPS) qualificado (Anexo IV). A caracterização macro e microestrutural está ilustrada nas figuras 7.25, 7.26 e 7.27, o mapeamento de linhas de dureza está na figura 7.28.

Os resultados da qualificação da soldagem da referida placa de teste pela norma AWS D1.1 está resumida na tabela 7.7. Pelos resultados, a soldagem foi considerada qualificada.

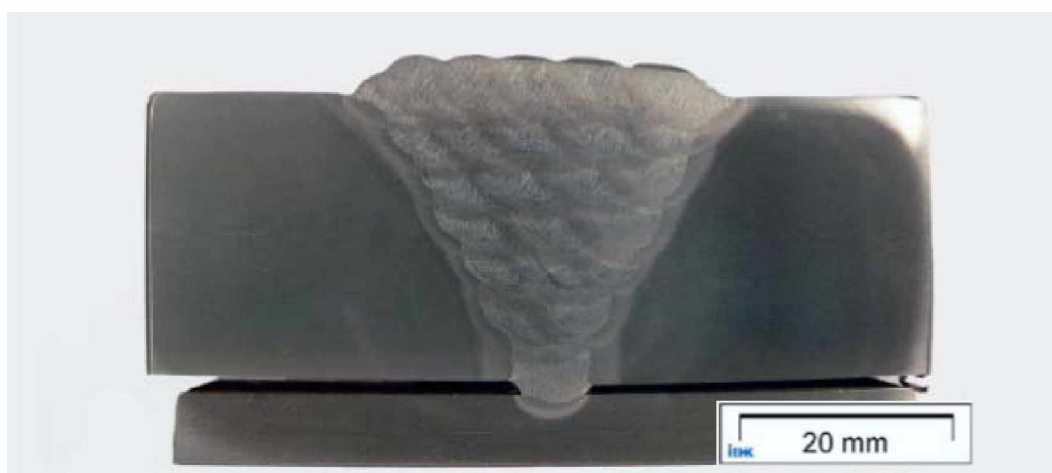


Figura 7.25 – Macrografia da seção transversal da placa de teste de 25,4 mm soldada por FCAW sem pré-aquecimento (junta de aço dissimilar Grau 65 com Grau 50)

Tabela 7.7 – Resultado de ensaios mecânicos em amostra de aço de 25,4 mm (junta de aço dissimilar Grau 65 com Grau 50) soldado em FCAW

Limite de Resistência à Tração (MPa)	Local de ruptura	Dureza (HV 10)		Dobramento
		MS	ZAC (60/50)	
532/537	Metal de base (Grau 50)	220	230/262	Isento de descontinuidade



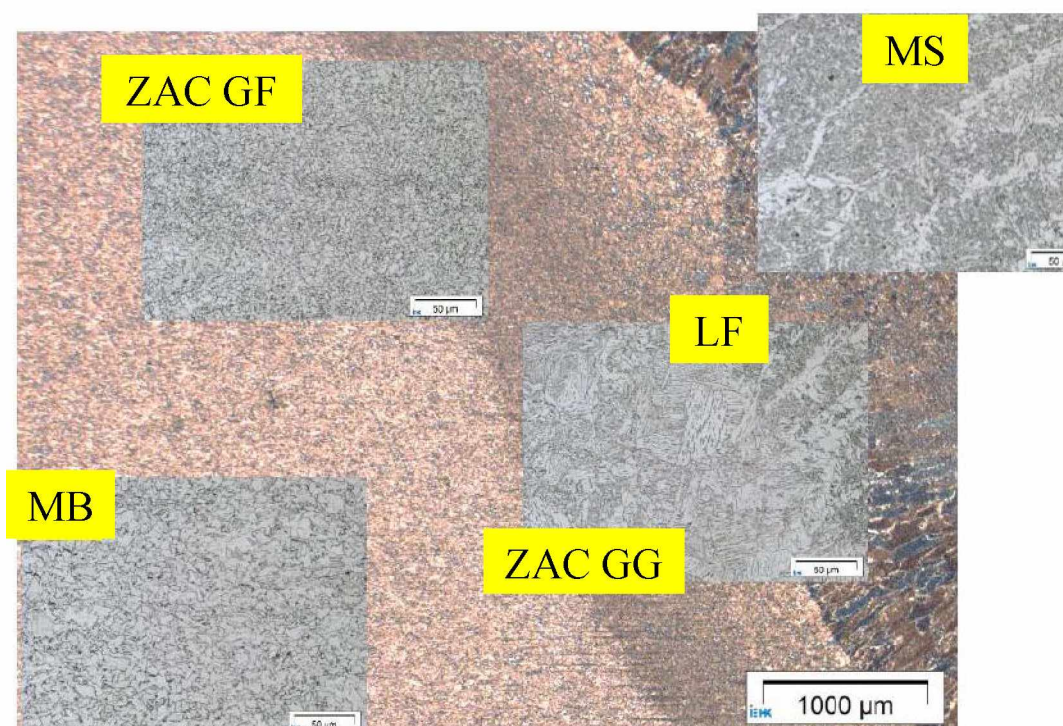


Figura 7.26 – Micrografia da seção transversal da placa de teste de 25,4 mm do aço grau 65 soldada por FCAW (MS – Metal de solda, LF – Linha de Fusão, ZAC GG – Região de crescimento de grãos da ZAC, ZAC GF – Região de refino de grãos da ZAC)

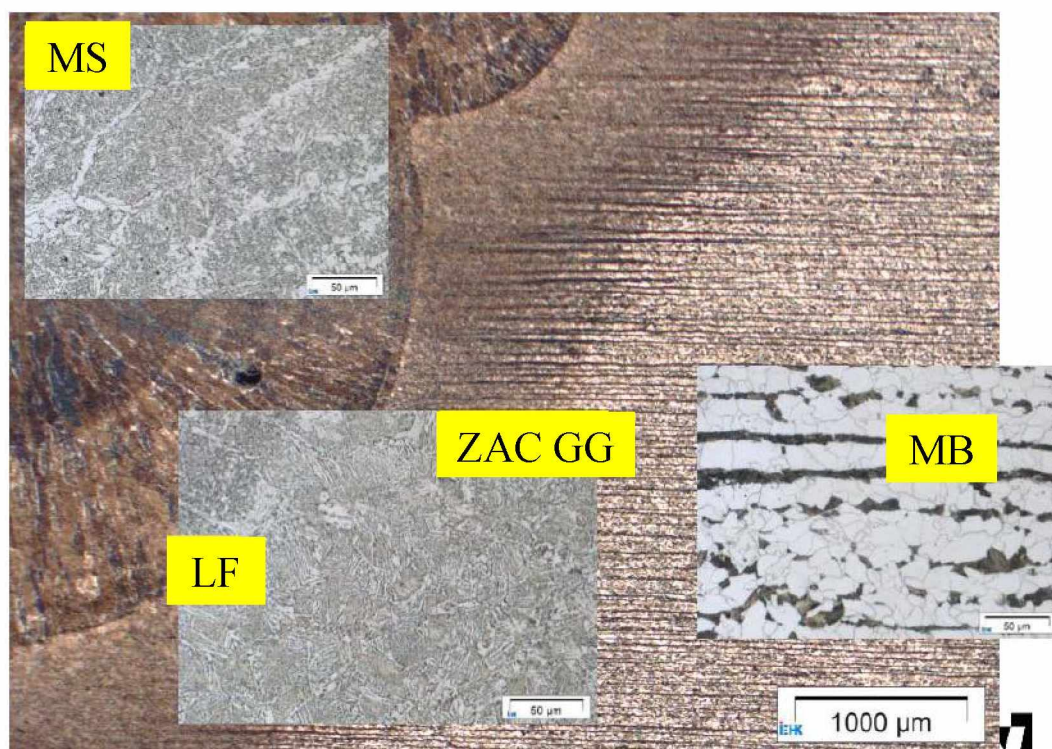


Figura 7.27 – Micrografia da seção transversal da placa de teste de 25,4 mm do aço grau 50 soldada por FCAW (MS – Metal de solda, LF – Linha de Fusão, ZAC GG – Região de crescimento de grãos da ZAC, ZAC GF – Região de refino de grãos da ZAC)



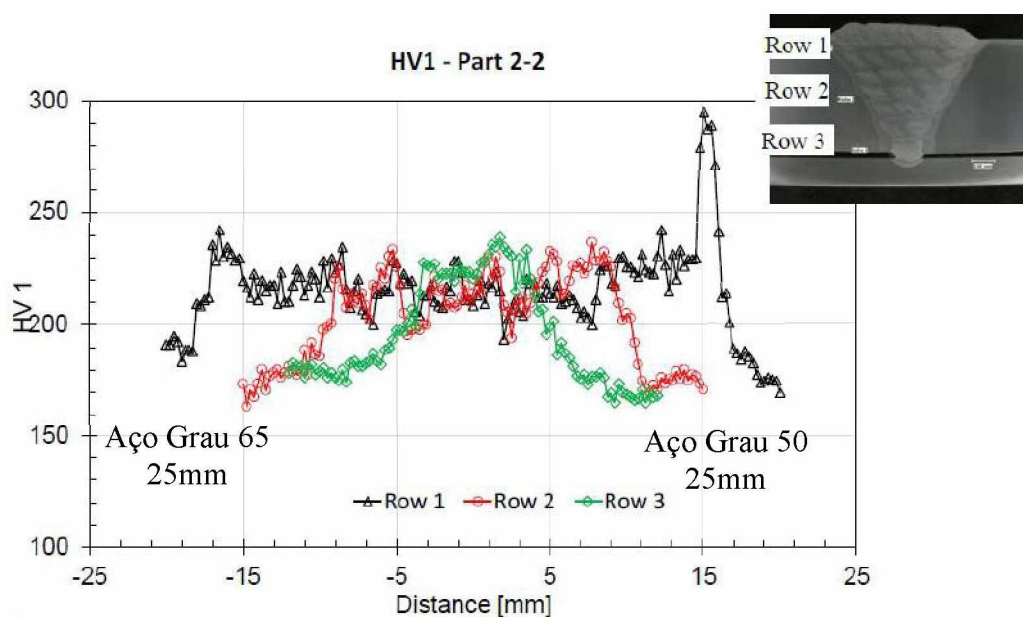
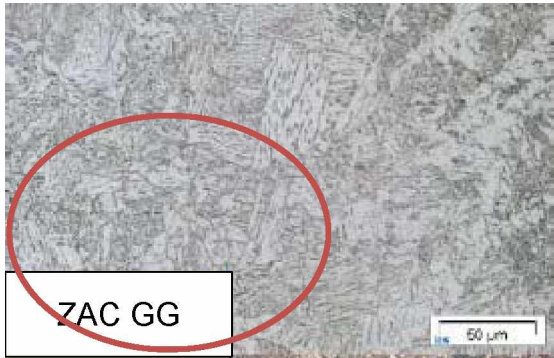
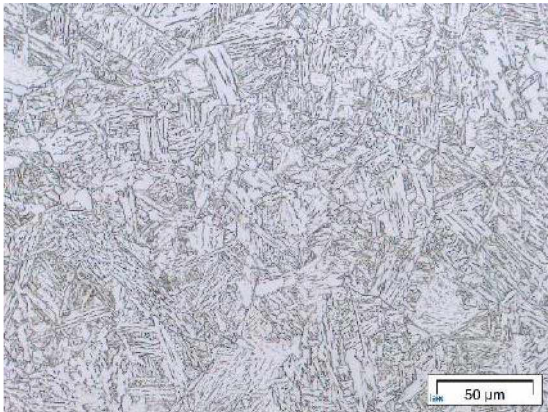


Figura 7.28 – Linha de dureza de junta plana de amostra de aço de 25,4 mm (junta de aço dissimilar Grau 65 com Grau 50) soldado em FCAW

#### 7.4.2 Comparação com resultados esperados no atlas

Tomando como referência as microestruturas e durezas da ZAC grosseira do passe de acabamento da soldagem das placas de teste, (figura 7.26), A determinação das velocidades de resfriamento impostas a essas regiões foi feita por comparação com micrografias do atlas. A tabela 7.8 compara a microestrutura e dureza das soldas reais com as microestruturas e durezas previstas no atlas.

Tabela 7.8 – Comparativo de microestruturas do estudo de caso 3 e do Atlas

Região selecionada para comparação da solda real	Atlas
 <p>ZAC GG</p> <p>HV 10 = 230</p>	<p>Microestrutura 6</p>  <p>HV 10 = 222 : <math>t_{8/5} = 10,8</math> s</p>

Concluiu-se, então, que a soldagem teve resfriamento  $t_8/5$  por volta de 11 segundos (microestrutura 6 do atlas) demonstrando grande proximidade entre as microestruturas e dureza do atlas e solda real para resfriamento mais acelerado.

### 7.4.3 Aplicação de programas computacionais para cálculo de resfriamento $t_8/5$ e temperatura de pré-aquecimento

**Step 1: Material analysis and calculation of the carbon equivalent**

%	Material analysis 1	Material analysis 2	Carbon equivalent	
C	0.07	0.16	CEV	0.34
Si	0.29	0.19	C equiv.	18.07
Mn	1.48	1.42	PCM	0.16
Cr	0	0.02	PLS C equiv.	0.10
Ni	0.16	0.01	C equiv.	0.17
Cu	0.14	0.02	CET	0.23
Mo	0	0	CE	0.34
V	0	0.005	CEN	0.23
Nb	0.02	0.047	CEM	0.17
B	0	0.0002		

Go back Delete values Calculate Step 2

**Step 2: Calculating the preheating temperature**

$$Q = k \cdot \sqrt{B} = k \cdot \frac{(T_f - T_0) \sqrt{A}}{\sqrt{v \cdot 1000}}$$

- The temperatures and heat input may still change after Step 3. The updated values are used for the final calculation.

Welding process		Heat input in kJ/mm	
Gas shielded arc we		0.75	
<b>Material 1</b>			
Panel thickness in mm	25.4	Minimum preheating temperature in °C	43 °C
<b>Material 2</b>			
Panel thickness in mm	12.5	Minimum preheating temperature in °C	54 °C

Go back Calculate Step 3

Figura 7.29 – Parâmetros comuns na simulação do passe de acabamento do procedimento FCAW junta de topo, chanfro em V, sem pré-aquecimento, junta dissimilar aço grau 50 e 65 (as entradas pelos usuários são a composição química, o processo e a espessura das chapas, sendo os demais valores calculados pelo programa)

**Step 3: Calculating the cooling time**

$$700 * CET + 160 * \tanh\left(\frac{d}{35}\right) + 62 * B^{0.35} + (3 * CET * B)^{0.38}$$

Arc voltage	Welding current	Welding speed in m/mm	Weld seam factor
29	230	4.5	Single-V
<b>Material 1</b>			
Transitional panel thickness		3.96 mm	
Cooling time $t_8/5$ in seconds		0.39 s	
<b>Material 2</b>			
Transitional panel thickness		4.13 mm	
Cooling time $t_8/5$ in seconds		0.46 s	

Go back Calculate Conclusion

**Conclusion**

Material 1	
Because the panel thickness was above the transitional panel thickness, the equation for three-dimensional heat dissipation applied.	
Transitional panel thickness	3.96 mm
Cooling time $t_8/5$ in seconds	0.39 s
Minimum preheating temperature	36 °C
CET	0.23
<b>Material 2</b>	
Because the panel thickness was above the transitional panel thickness, the equation for three-dimensional heat dissipation applied.	
Transitional panel thickness	4.13 mm
Cooling time $t_8/5$ in seconds	0.46 s
Minimum preheating temperature	69 °C
CET	0.30

Go back Start

Figura 7.30 – Parâmetros e resultado de simulação do passe de acabamento do procedimento FCAW junta de topo, chanfro em V, sem pré-aquecimento, junta dissimilar aço grau 50 e 65 (as entradas pelos usuários são os parâmetros de soldagem, sendo os demais valores calculados pelo programa)

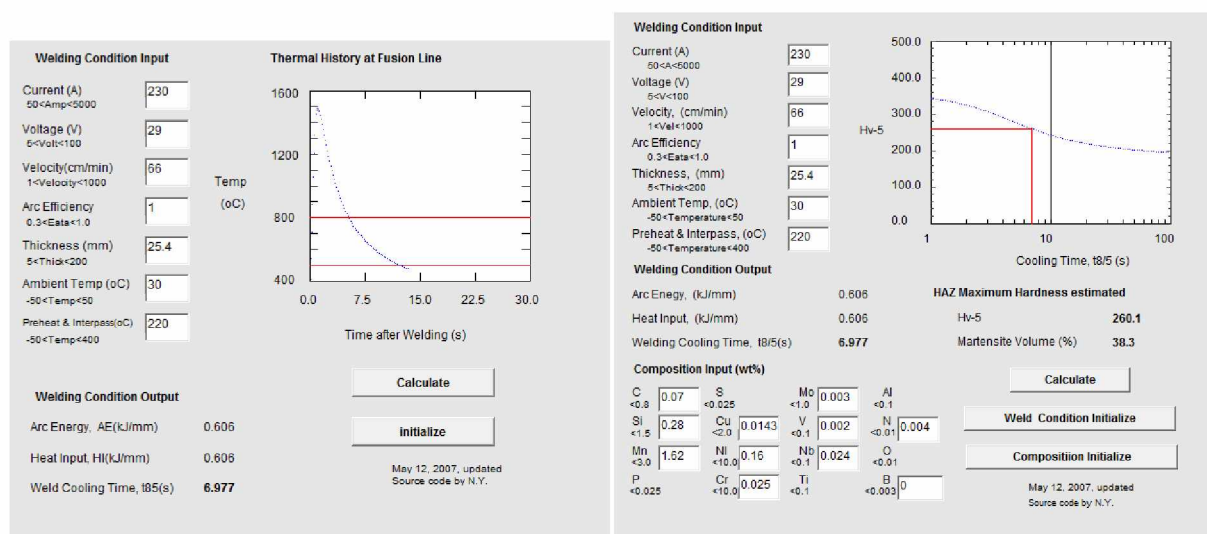


Figura 7.31 – Parâmetros e resultado de simulação da história térmica do passe de acabamento do procedimento FCAW junta de topo em aço Grau 65, chanfro em V, sem pré-aquecimento, (os campos para entrada de dados estão destacados como caixas)

**Pre-heat Calculator**

Pre-Heat Calculator to EN1011 Part 2 - Non Alloyed And Low Alloy Steels.

[Information on how to use this page](#)

- Heat Input**  
 Enter Arc Energy KJ/mm 0.66 OR Calculate  
 Select Welding Process Flux Cored Arc Welding  
 Heat Input KJ/mm = 0.53 *Note, this box is not for data input.*
- Carbon Equivalent**  
 Enter Carbon Equivalent 0.34 OR Calculate
- Hydrogen Scale**  
 Select Hydrogen Scale C (MMA Basic Electrodes + MIG/MAG) 5 - 10ml/100g
- Combined Thickness**  
 Enter Combined Thickness mm 50 *Note Thickness must be 2 x T for a butt weld*
- Calculate Pre-Heat**  
 Calculate Pre-Heat Min Pre-Heat Temperature= 20 °C

Figura 7.32 – Cálculo de pré-aquecimento mínimo para procedimento FCAW junta de topo no aço grau 65 (as entradas pelos usuários são a energia do arco, o processo de soldagem, o carbono equivalente, o H<sub>2</sub> difusível e a espessura, sendo o calor imposto e a temperatura de pré-aquecimento as respostas calculadas)



**Pre-heat Calculator**

---

Pre-Heat Calculator to EN1011 Part 2 - Non Alloyed And Low Alloy Steels.

---

[Information on how to use this page](#)

---

- Heat Input**  
 Enter Arc Energy KJ/mm  OR   
 Select Welding Process   
 Heat Input KJ/mm =  Note, this box is not for data input.

---

- Carbon Equivalent**  
 Enter Carbon Equivalent  OR

---

- Hydrogen Scale**  
 Select Hydrogen Scale

---

- Combined Thickness**  
 Enter Combined Thickness mm  Note Thickness must be 2 x T for a butt weld

---

- Calculate Pre-Heat**  
 Min Pre-Heat Temperature=  °C

Figura 7.33 – Cálculo de pré-aquecimento mínimo para procedimento FCAW junta de topo no aço grau 50 (as entradas pelos usuários são a energia do arco, o processo de soldagem, o carbono equivalente, o H<sub>2</sub> difusível e a espessura, sendo o calor imposto e a temperatura de pré-aquecimento as respostas calculadas)

Como demonstrado pelas figuras 7.29 e 7.30, o cálculo do programa computacional 1 apresentou valores de  $t_{8/5}$  de 0,4 s no aço grau 65. O programa computacional 2 (figura 7.31), utilizando como temperatura de pré-aquecimento/interpasse para o passe de acabamento a temperatura de interpasse máxima descrito no Anexo IV, portanto mais similar com o praticado na solda real, apresentou resultados de  $t_{8/5}$  de aproximadamente 7,0 s.

Comparando estas previsões com os resultados obtidos pela aplicação da metodologia deste trabalho (seção 7.4.2), que foi de 10,8 s, verifica-se discrepância muito grande em relação ao programa computacional 1 e certa proximidade com o 2. Uma velocidade de resfriamento calculada com o programa computacional 1, levaria (ver diagrama CCT do aço na seção 5.1.3) a microconstituintes 100% martensíticos, em relação ao tempo do programa computacional 2 os microconstituintes seriam majoritariamente bainíticos com cerca de 15% de martensita que está discrepante aos 38% previsto. Na solda real (que foi basicamente de microestrutura bainítica) não foi possível observar a martensita prevista nos dois programas, confirmando as inexatidões descritas no estudo de caso 1 e 2.

Em relação ao pré-aquecimento, o programa 1 prevê uma necessidade de pré-aquecimento de cerca de 90 °C e o programa 3 de 100 °C no aço grau 50 (o grau 65 apesar

de maior resistência não necessitaria de pré-aquecimento). Neste caso o uso do pré-aquecimento não está descrito no procedimento descrito na EPS da empresa CODEME e poderia ser necessário para evitar o ponto de alta dureza encontrado no lado direito da soldagem.

## 7.5 Cálculo de ganhos

Para o cálculo dos possíveis ganhos obtidos na aplicação desta metodologia, que configuraria minimamente a retirada do processo de pré-aquecimento, foi determinado, a partir dos dados do processo de fabricação de perfis da empresa CODEME as seguintes informações:

- Vazão de gás GLP na mistura de pré-aquecimento: 2000 l/h
- Vazão de gás O<sub>2</sub> na mistura de pré-aquecimento: 8000 l/h
- Número de bicos chuveiro: 4
- Tempo de pré-aquecimento por comprimento soldado: 20 min/m
- Comprimento soldado (projeto Anexo I): 21846,54 m
- Custo de gás GLP: R\$ 4,00/kg
- Custo de gás O<sub>2</sub>: R\$ 0,64/m<sup>3</sup>

Foram utilizados os seguintes dados da metodologia do IPCC:

- Densidade GLP: 2,5 kg/m<sup>3</sup>
- NCV: 46,5 TJ/Gg
- Fator de emissão GLP (kg/TJ)
  - CO<sub>2</sub>: 63100
  - CH<sub>4</sub>: 1
  - N<sub>2</sub>O: 0,1

- CO<sub>2</sub> equivalente (GWP):

- CH<sub>4</sub>: 25

- N<sub>2</sub>O: 298

Cálculo para o GLP:

$$\text{Consumo GLP} = \frac{2000}{1000} \times 4 \times \frac{20}{60} \times 21846,54 \times 2,5 = 145643,6 \text{ kg}$$

$$\text{Custo GLP} = 145643,6 \times 4,00 = \text{R\$ } 582.574,40$$

$$\text{Energia} = 145643,6 \times 46,5 \times 10^{-6} = 6,77 \text{ TJ}$$

$$\text{CO}_2e = 6,77 \times [63100 + (1 \times 25) + (0,1 \times 298)] = 427558 \text{ kg}$$

Cálculo para o oxigênio:

$$\text{Consumo O}_2 = \frac{8000}{1000} \times 4 \times \frac{20}{60} \times 21846,54 = 233029,76 \text{ m}^3$$

$$\text{Custo O}_2 = 233029,76 \times 0,64 = \text{R\$ } 149.139,05$$

O oxigênio não contribui para energia uma vez que é o agente oxidante da queima, apenas garantindo a completa queima do GLP, o mesmo vale para emissão de gases de efeito estufa.

Desta forma a adoção de um procedimento de soldagem sem pré-aquecimento permitirá uma redução de custo de fabricação de aproximadamente R\$ 732 mil no projeto descrito no anexo I, além de uma economia de 6,77 TJ (tera joule) de energia e uma redução de emissão de gases de efeito estufa de 427,6 toneladas de carbono equivalente.

O tempo economizado em processo pelo não uso de pré-aquecimento, pode ser facilmente calculado levando-se em consideração que existe uma simultaneidade de avanço de solda e pré-aquecimento em 50% do tempo do processo de soldagem (tempo em que ocorrem os dois processos, pré-aquecimento e soldagem, ao mesmo tempo).

$$\text{Tempo}_{\text{pré-aquecimento}} = \frac{20}{60} \times 21846,54 \times 0,5 = 3641 \text{ h}$$

## CAPÍTULO VIII

### CONCLUSÕES

Conclui-se que o Atlas de soldagem, criado com base em diagramas CCT e propriedades mecânicas obtidos a partir de amostras de simulação física de ciclos térmicos, pode ser utilizado de forma simples e eficaz, tanto para definição de limites de energia de soldagem nas elaborações de EPS, quanto no controle de qualidade das soldagens. Desta forma, o atendimento mínimo dos parâmetros estabelecidos no procedimento de soldagem pode ser feito pela comparação direta da microestrutura e dureza de amostras retiradas durante a produção de perfis estruturais com as existentes no Atlas.

A aplicação do Atlas no caso do aço Sincron (ASTM A572 Grau 65) mostrou que não haveria necessidade do uso de pré-aquecimento para evitar microestruturas frágeis e susceptíveis a trincas de hidrogênio. Mostrou também que no caso de se desejar maiores tenacidades na região de grãos grosseiros da ZAC, outros parâmetros de soldagem poderiam ter sido especificados para se obter velocidades de resfriamento maiores, já que o Atlas mostrou que o aço em estudo tem um amplo envelope de soldabilidade. Desta forma, conclui-se que é possível, pelo uso do atlas, aumentar a confiabilidade da resposta metalúrgica dos parâmetros de soldagem selecionados em elaboração de EPS para aços estruturais e, assim, tornar as EPS menos conservativas e mais econômicas.

Demonstrou-se, pela aplicação da abordagem, que seria possível economizar recursos financeiros significativos pela retirada do processo de pré-aquecimento (em termos de GLP ou gás natural), que se mostrou desnecessário, mas estava incluso nas EPS da empresa fabricante de estrutura metálica. Não se contabilizou, por exemplo, as vantagens econômicas pela redução do tempo de fabricação. Esta eliminação de pré-aquecimento permitiria, por si só, também redução de consumo de energia ambiental e emissões de gases de efeito estufa.



## CAPÍTULO IX

### TRABALHOS FUTUROS

Como forma de sedimentar e expandir os conhecimentos obtidos durante o desenvolvimento desta dissertação e contribuir para o melhor conhecimento dos efeitos de soldagem em aços estruturais, sugere-se como possibilidade para trabalhos futuros:

- Criar de uma forma clara um manual para usuários do Atlas (utilizando as ideias discutidas no item 6.1),
- Desenvolver um Atlas de soldagem digital piloto para um dado aço, de forma organizada e com ferramentas de busca, com informações completas sobre os microconstituintes e propriedades mecânicas (principalmente dureza e tenacidade), que possa servir tanto para definição das faixas operacionais de parâmetros de qualquer processo de soldagem para se soldar esse aço, como para certificação de conformidade durante controle de qualidade;
- Fomentar o uso deste Atlas piloto por potenciais usuários e acompanhar e avaliar o benefício alcançado com tal metodologia;
- Expandir o Atlas para incluir os efeitos de tratamentos térmicos posteriores a soldagem (pós-aquecimento e tratamento térmico de alívio de tensões);
- Expandir o Atlas para incluir microestruturas da região intercrítica da solda, simulando soldagem multipasses.

## CAPÍTULO X

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADONYI, Y. **Heat-Affected Zone Characterization by Physical Simulations**. Welding Journal, p.42-47, Oct. 2006.

ALBERRY, P.; JONES W. **Diagram for the prediction of weld heat-affected zone microstructure**. Metals Technology, p.360-364, July 1977.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A36/A36M – 12A**: Standard Specification for Carbon Structural Steel. 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A572/A572M – 13**: Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel. 2013.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS D1.1/D1.1M**: An American National Standard; Structural Welding Code – Steel. 2010.

AMERICAN WELDING SOCIETY, **Welding FAQs**. Disponível em: <<https://app.aws.org/wj/2002/12/feature1/>>. Acesso em 07 de Agosto de 2015.

BARBARO, F. J.; Zhu, Z.; Kuzmikova, L.; Li, H.; Gray, J. M. **Towards Improved Steel Alloy Designs for Control of Weld Heat Affected Zone Properties**. 2nd International Symposium on Nb and Mo Alloying in High Performance Steels, p. 1-13, 2013.

BARBOSA, R. **Curso de Metalurgia física na laminação de aços microligados**. 50º Seminário de Laminação da ABM, Novembro 2013.

BALLESTEROS, A. F. **Avaliação da Resistência de Juntas Soldadas Circunferenciais de Aço API 5L X-80 à Corrosão sob Tensão na presença de sulfetos e Susceptibilidade à Fragilização por Hidrogênio**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos da PUC-RJ, 2009.

BHADESHIA, H. K. D. H. **Bainite in Steels: Theory and Practice**. 3ª ed, The Institute of Materials, Minerals and Mining, Maney Publishing, Leeds, UK, 2015.

BHADESHIA, H. K. D. H. **Production and metallurgy of advanced bainitic steels**. Steel Technology International, p289-294, 1989.

CHIAVERINI, V.; **Aços e Ferros Fundidos**. 7ª Edição, São Paulo, ABM, 2012.

CRUZ-CRESPO A., ARAUJO D. B., SCOTTI A., **Effect of Tempering Pass on HSLA-80 Steel HAZ Microstructures**. Welding Journal, p.304-s-311-s, Outubro 2013.

DYSON, J. **Preheat calculator**. Disponível em: <<http://www.gowelding.com/>>. Acesso em 29 de Agosto de 2015.

EWM-GROUP. **Welding calculators – calculating cooling time  $t_{8/5}$** . Disponível em: <<https://www.ewm-group.com/en/practical-knowledge/welding-calculators/cooling-time.html>>. Acesso em 05 de Agosto de 2015.

ESAB GROUP. **Catálogo de Produtos Condor**. Disponível em: <[http://www.as-solucoes.com.br/download/Condor\\_2012.pdf](http://www.as-solucoes.com.br/download/Condor_2012.pdf)>. Acesso em 16 de Outubro de 2015.

FLUESS, P.; VALENTIN, R.; SCHWINN, V.; HANUS, F. **Application of Nb in TMCP Structural Steel Plates with Thickness up to 120 mm**. Niobium Bearing Structural Steels – TMS, p.89-103, 2010.

HOLSBERG, P.W.; WONG R.J. **Welding of HSLA-100 Steel for Naval Applications**. Weldability of Materials, ASM International, 1990.

HULKA K.; GRAY J. M.; HEISTERKAMP F. **Niobium Technical Report 16/90**. CBMM, 1990, p. 53.

ICHIKAWA K., FUJIOKA M., UEMORI R., YOSHIE A., **Progress in Thermomechanical Control Process Steel Plates**. 2011 International Symposium on the Recent Developments in Plate Steels, AIST, Winter Park, Colorado, USA, Junho 2011.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Volume 2 – Energy**, IGES, Japão, 2006.

JANSTO, S. G. **Niobium-Bearing Plate Steels for the 21st Century**. 2011 International Symposium on the Recent Developments in Plate Steels, AIST, Winter Park, Colorado, USA, Junho 2011a.

JANSTO, S. G., **The Contribution of Niobium-Bearing Steels and Enhanced Sustainability**. The 6th International Conference on High Strength Low Alloy Steels, Beijing, China, 2011b.

KEEHAN, E. **Effect of Microstructure on Mechanical Properties of High Strength Steel Weld Metals**. Thesis for the degree of doctor of Philosophy, Chalmers University of Technology and Göteborg University, 2004.

KIRKWOOD, P. **Niobium and Heat Affected Zone Mythology**. Welding of High Strength Pipeline Steels, International Seminar, Araxá, Brasil, Novembro 2011.

LAN, L. et AL. **Microstructural characteristics and toughness of the simulated coarse grained heat affected zone of high strength low carbon bainitic steel**. Materials Science and Engineering, A 529, p.192-200, Elsevier, 2011.

LANGENBERG, P. **Qualification of High Strength Nb-alloyed structural steels for a steel construction demonstration project**. IWT Report P14-211-1, 2014.

LANGENBERG, P. **Quality matters – material requirements in Eurocode 3 (EN1993) in view of component safety**. Value-added Niobium microalloyed, 2014.

LOLLA T., BABU S. S., LALAM S., MANOHAR M. **Comparison of Simulated Heat Affected Zone Microstructures of Niobium Microalloyed Steels Subjected to Multi-Pass Weld Thermal Cycles**. Welding of High Strength Pipeline Steels, International Seminar, Araxá, Brasil, Novembro 2011.

MEESTER, B. **The Weldability of Modern Structural TMCP Steels**. ISIJ International, Vol. 37, No. 6, p.537-551, 1997.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanco Energético Nacional 2012 (ano base 2011)**. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/default.aspx>>. Acessado em: 19 de Outubro de 2015.

MODENESI, P.J., MARQUES, P.V., SANTOS, D.B. **Apostila de Introdução a Metalurgia da Soldagem**. UFMG, 2006.



MORRISON W. B. **Overview of Microalloying in Steel**. The Proceedings of the Vanitec Symposium, Guilin, China, 2000.

ONSØIEN, M. I.; M'HAMDI, M.; MO, A. **A CCT Diagram for an Offshore Pipeline Steel of X70 Type**. Supplement to Welding Journal, p.1s-6s, Jan. 2009.

OUCHI, C. **Development of Steel Plates by Intensive Use of TMCP and Direct Quenching Processes**. ISIJ International, Vol.41, No 6, p.542-553, 2001.

PRASAD K., DWIVEDI, D. K. **Some investigations on microstructure and mechanical properties of submerged arc welded HSLA steel joints**. Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol 36, p.475–483, 2008.

PERINI F. G. **Propriedades Mecânicas e Microestruturais de aços de alta resistência e baixa liga soldados**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação Materiais da Universidade de Caxias do Sul, 2008.

SCOTTI A., LI H., MIRANDA R. M. **Um Round-Robin Teste com Simulação Térmica da ZAC de Soldagem para Obtenção de Diagramas CRC: a necessidade de procedimentos e terminologia de microconstituintes harmonizados**. Soldagem e Inspeção, São Paulo, Vol. 19, Nº. 03, p.279-290, Jul/Set 2014.

SILVESTRE, L. et AL. **High Strength Steel as a Solution for the Lean Design of Industrial Buildings**. Journal of Materials Research and Technology, p.35-41, Elsevier, 2012.

SPANOS, G.; FONDA, R.W; VANDERMEER, R.A.; MATUSZESKI, A. **Microstructural Changes in HSLA-100 Steel Thermally Cycled to Simulate the Heat-Affected Zone during Welding**. Metallurgical and Materials Transactions A, Volume 26A, p.3277-3293, December 1995.

STALHEIM, D. G; MURALIDHARAN, G. **The Role of Continuous Cooling Transformation Diagrams in Material Design for High Strength Oil and Gas Transmission Pipeline Steels**. Proceedings of IPC 2006, 6th International Pipeline Conference, Calgary, Alberta, Canada, 2006.

SUZUKI, S.; REES G.I.; BHADESHIA, H. K. D. H. **Modelling of Brittle Zones in the HAZ of Steel Welds**. Modelling and Control of Joining Processes, ed. T. Zacharia, American Welding Society, Florida, U.S.A., p.186-193, 1993.

TAKAHASHI, M.; BHADSHIA, H. K. D. H. **The interpretation of dilatometric data for transformation in steels.** Journal of Materials Science Letters, Volume 8, p.477-478, 1989.

TURANI, L.; BORBA, T.; CARDOSO JUNIOR, R.; GAMA, H., OLIVEIRA JUNIOR, G. **Soldabilidade do aço estrutural EN 10025-4 S355M na fabricação de torres eólicas.** 69º Congresso Anual da ABM – Internacional, 2014.

VOESTALPINE GROBBLECH GMBH. **WEZ – Simulation von modernen Röhrenstählen:** 2<sup>nd</sup> Report. December 2013.

WEBSTER, S. **The Weldability of Low Carbon High Niobium Steels Designed for Linepipe and General Use within the HIPERC Project.** Welding of High Strength Pipeline Steels, International Seminar, Araxá, Brasil, Novembro 2011.

YANG, J. R., BHADSHIA, H. K. D. H. **Reaustenitisation from Bainite.** Proceedings of an International Conference: Phase Transformations '87, Institute of Metals, London, Edited by G. W. Lorimer, pp. 203-206, 1988.

YURIOKA, N. **NIPPON STEEL Weldability Calculation.** Disponível em: <<http://homepage3.nifty.com/yurioka/exp.html>>. Acesso em 29 de Agosto de 2015.

## APÊNDICE I

### INFORMAÇÕES DETALHADAS DOS ENSAIOS REALIZADOS

#### 1 Curvas de aquecimento e resfriamento detalhadas do ensaio inicial

As figuras A.1.1 a A.1.24 demonstram os ciclos térmicos simulados em dilatômetros com as respectivas curvas de temperatura e dilatação durante o aquecimento (item 1.1) e resfriamento (item 1.2).

##### 1.1 Curvas de aquecimento

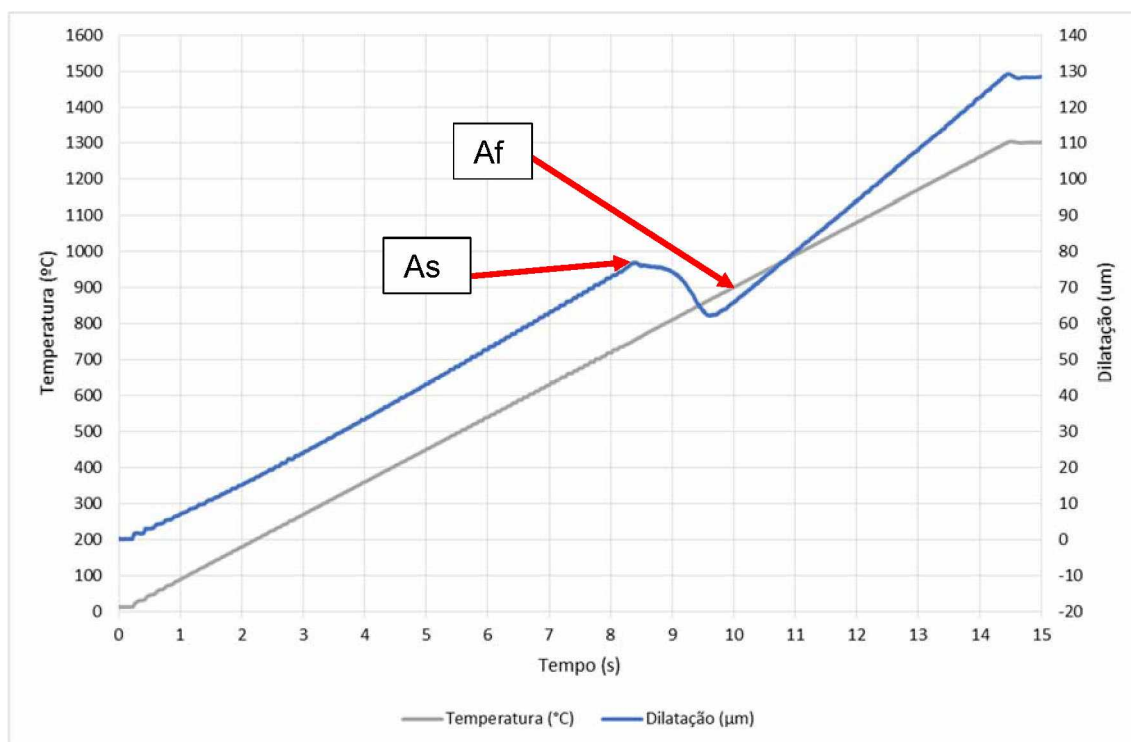


Figura A.1.1 – Aquecimento da simulação térmica através de dilatometria para  $t_{8/5} = 0,6s$  (ensaio inicial), onde sobre a curva de dilatação, As indica o início da transformação da austenita, Af indica fim da austenitização

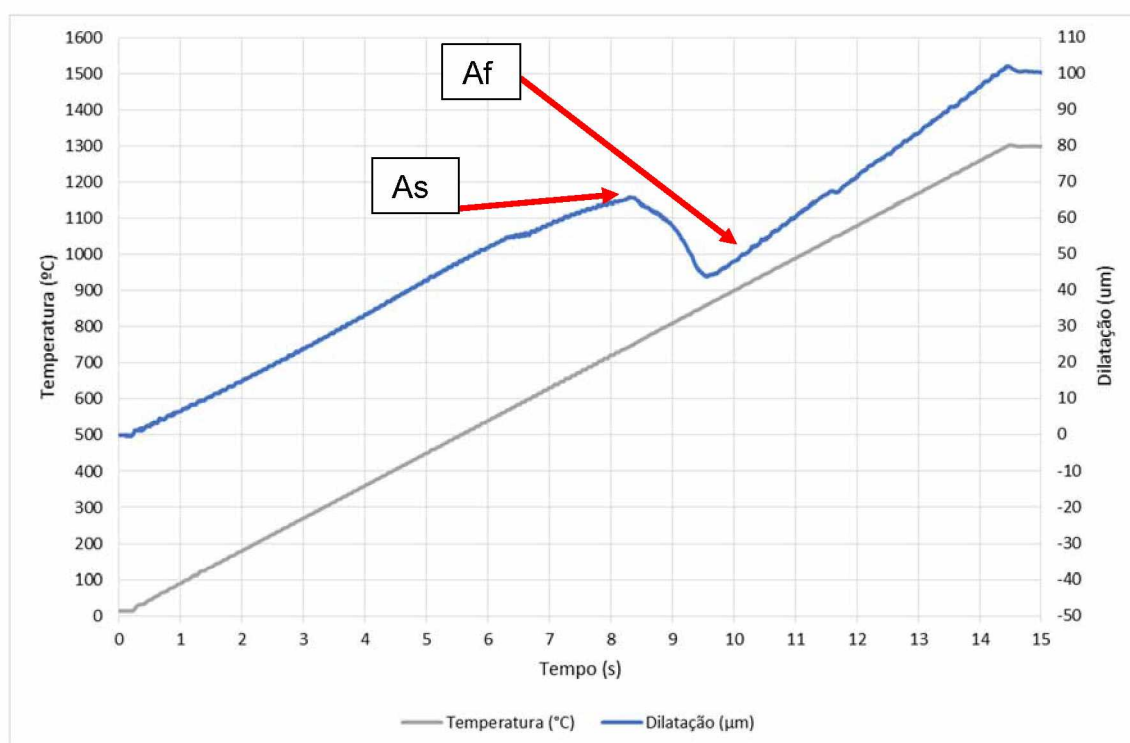


Figura A.1.2 – Aquecimento da simulação térmica através de dilatometria para  $t_{8/5} = 1,8$  s (ensaio inicial), onde sobre a curva de dilatação, As indica o início da transformação da austenita, Af indica fim da austenitização

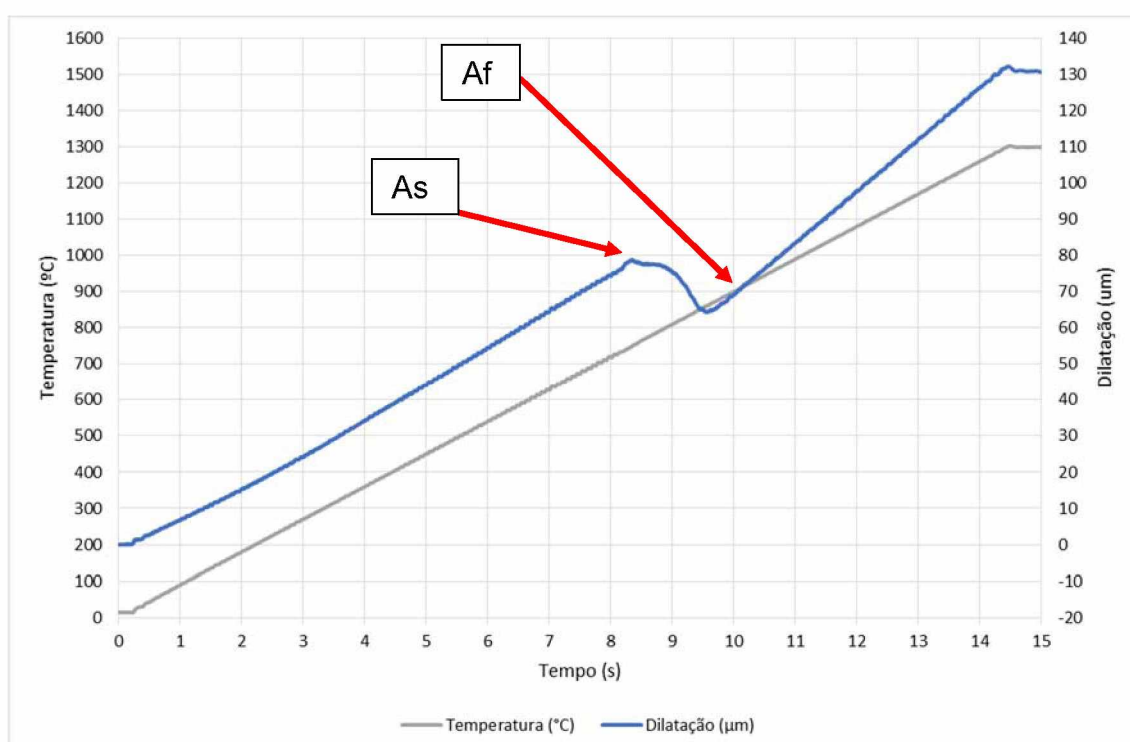


Figura A.1.3 – Aquecimento da simulação térmica através de dilatometria para  $t_{8/5} = 2,6$  s (ensaio inicial), onde sobre a curva de dilatação, As indica o início da transformação da austenita, Af indica fim da austenitização

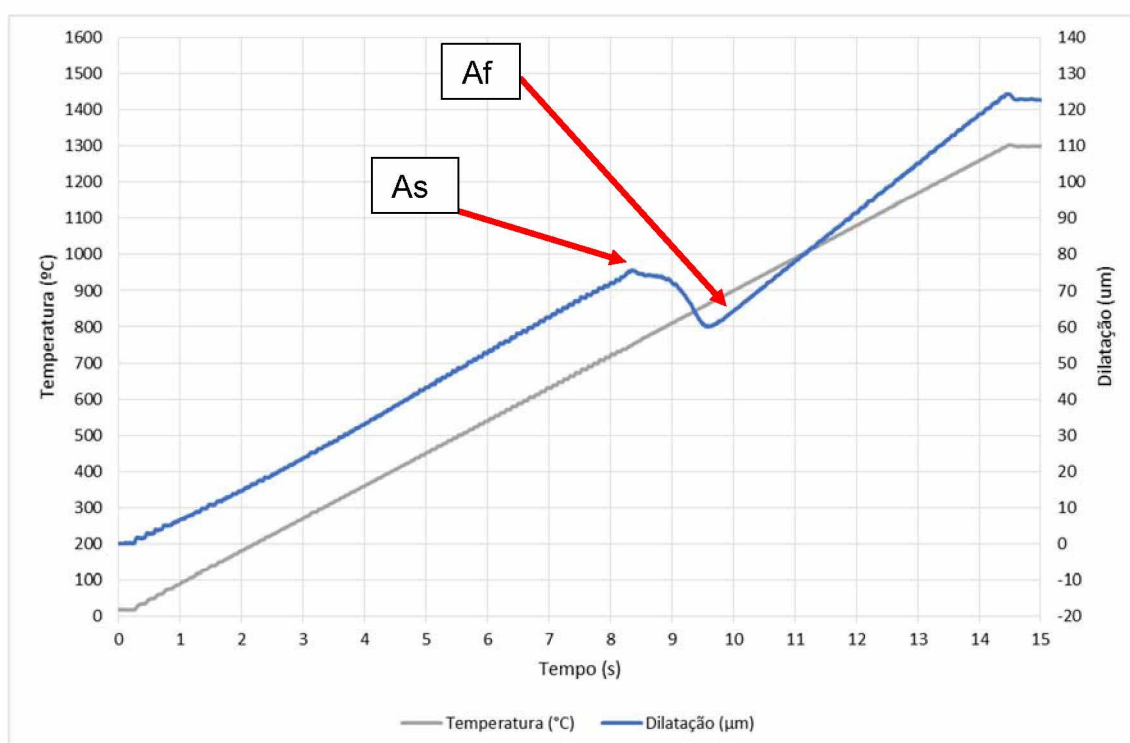


Figura A.1.4 – Aquecimento da simulação térmica através de dilatométrica para  $t_{8/5} = 6,4$  s (ensaio inicial), onde sobre a curva de dilatação, As indica o início da transformação da austenita, Af indica fim da austenitização

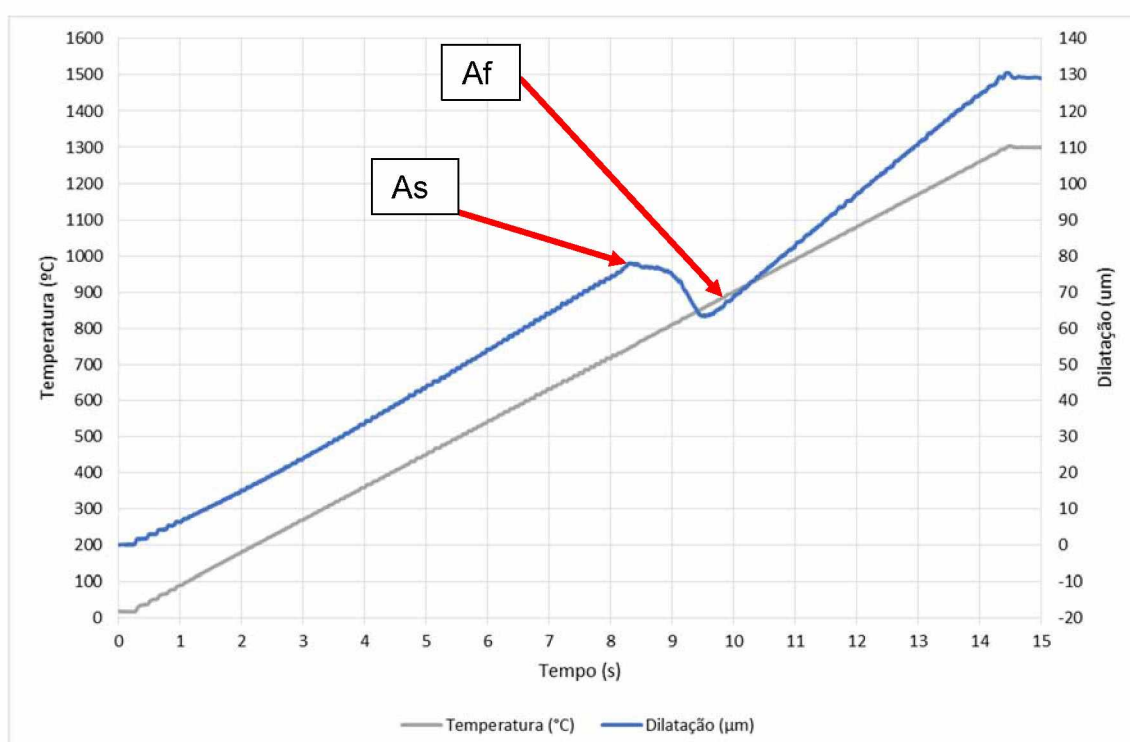


Figura A.1.5 – Aquecimento da simulação térmica através de dilatométrica para  $t_{8/5} = 13,3$  s (ensaio inicial), onde sobre a curva de dilatação, As indica o início da transformação da austenita, Af indica fim da austenitização



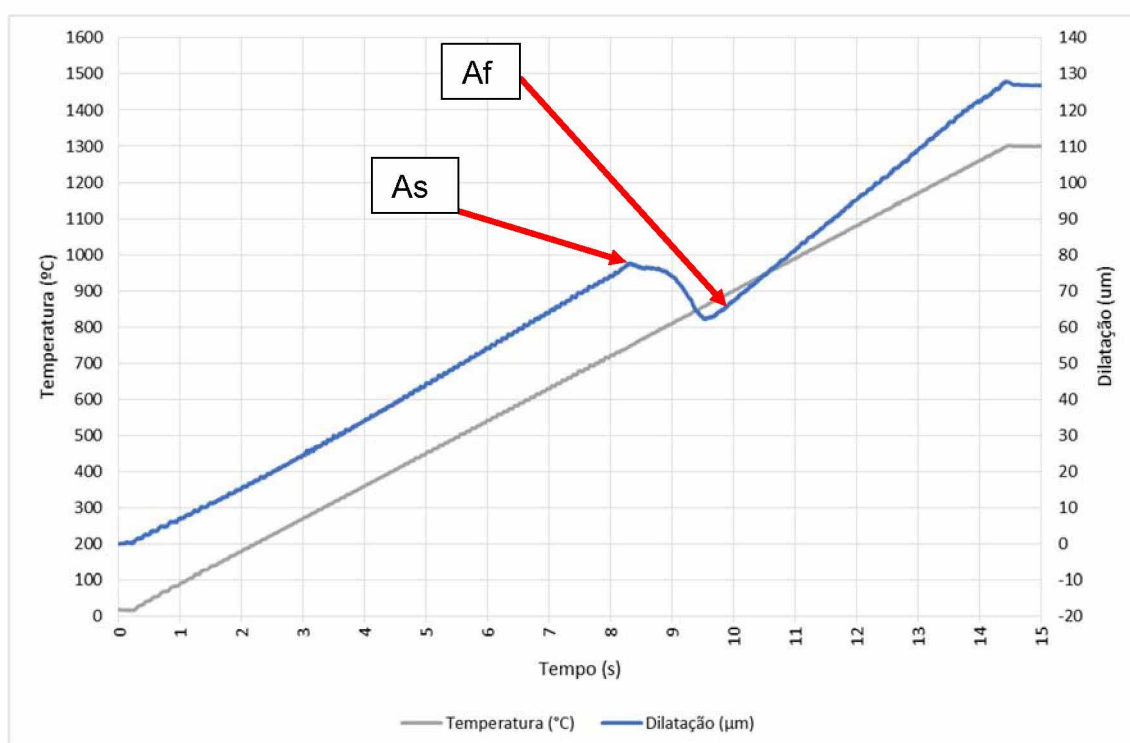


Figura A.1.6 – Aquecimento da simulação térmica através de dilatometria para  $t_{8/5} = 26,1$  s (ensaio inicial), onde sobre a curva de dilatação, As indica o início da transformação da austenita, Af indica fim da austenitização

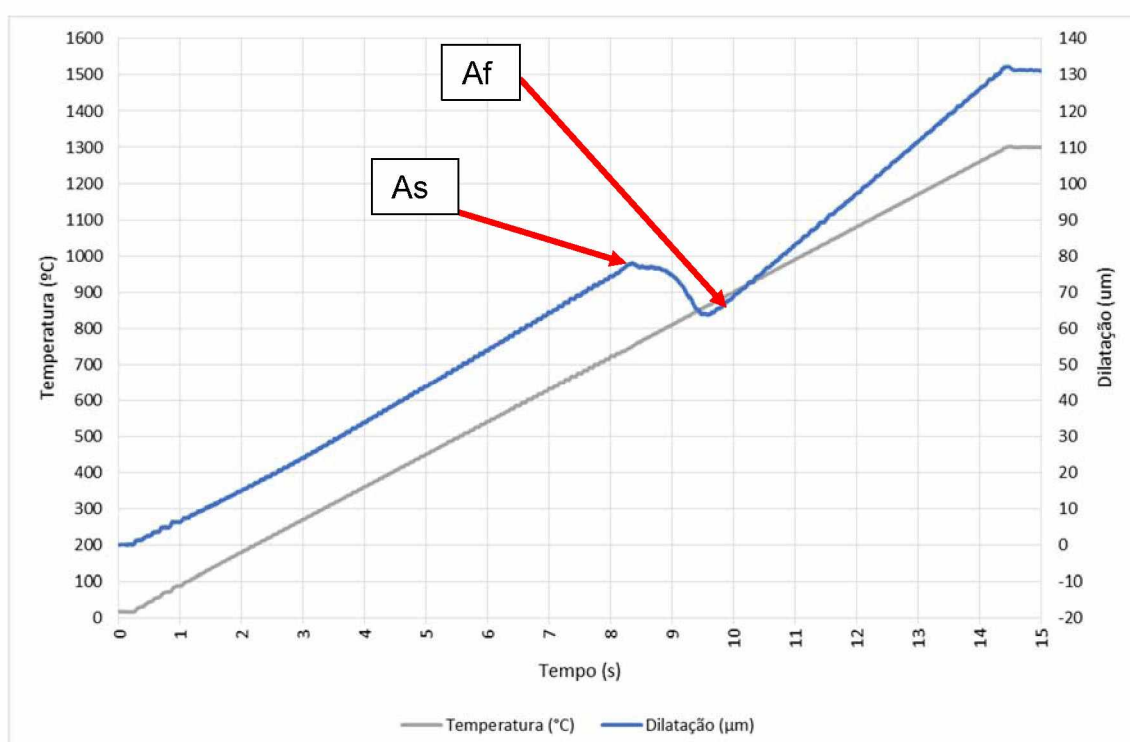


Figura A.1.7 – Aquecimento da simulação térmica através de dilatometria para  $t_{8/5} = 52,0$  s (ensaio inicial), onde sobre a curva de dilatação, As indica o início da transformação da austenita, Af indica fim da austenitização

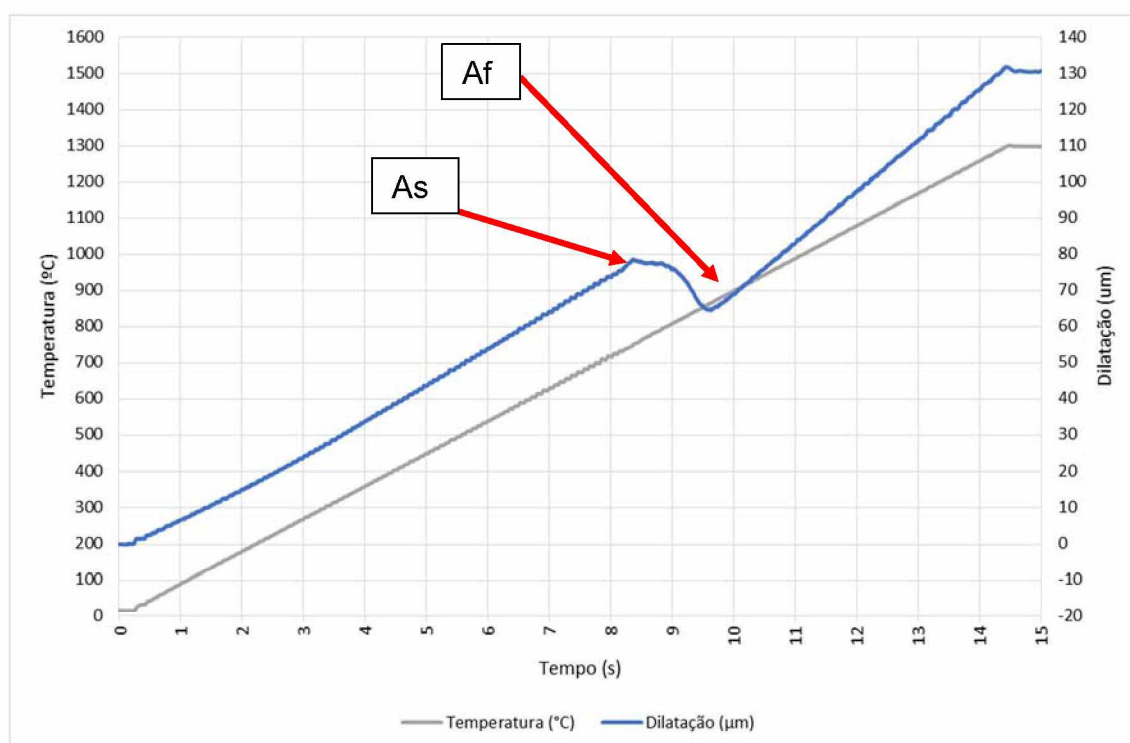


Figura A.1.8 – Aquecimento da simulação térmica através de dilatometria para  $t_{8/5} = 104$  s (ensaio inicial), onde sobre a curva de dilatação, As indica o início da transformação da austenita, Af indica fim da austenitização

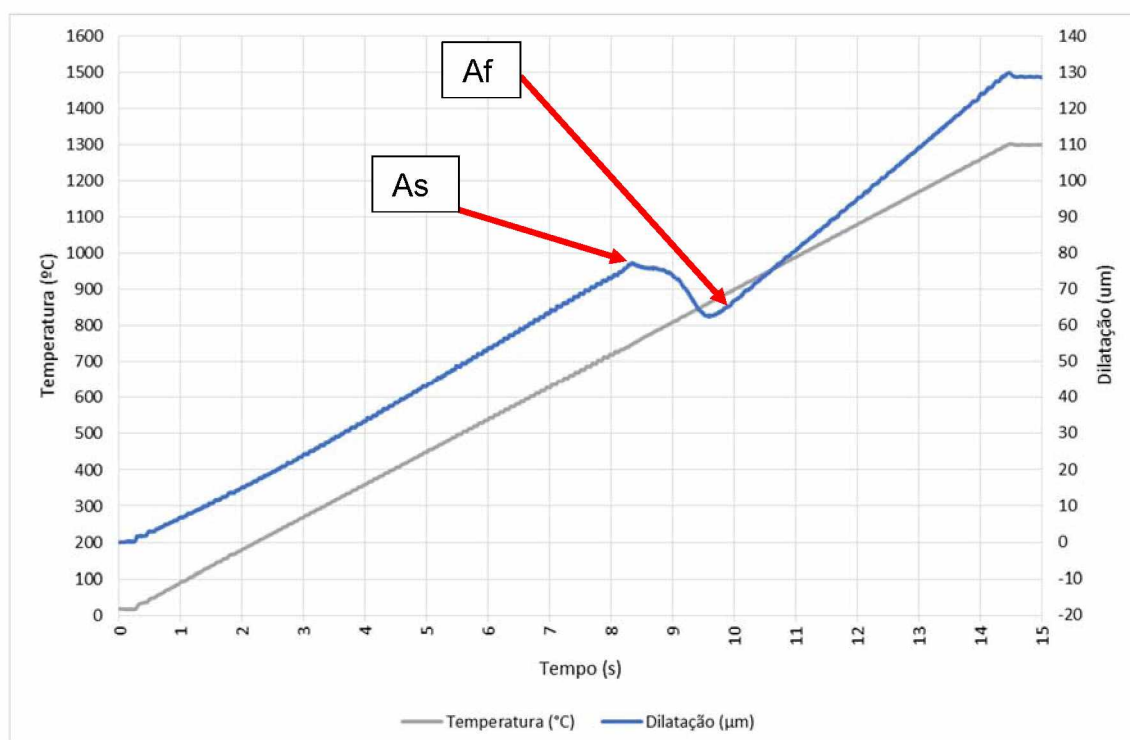


Figura A.1.9 – Aquecimento da simulação térmica através de dilatometria para  $t_{8/5} = 208$  s (ensaio inicial), onde sobre a curva de dilatação, As indica o início da transformação da austenita, Af indica fim da austenitização

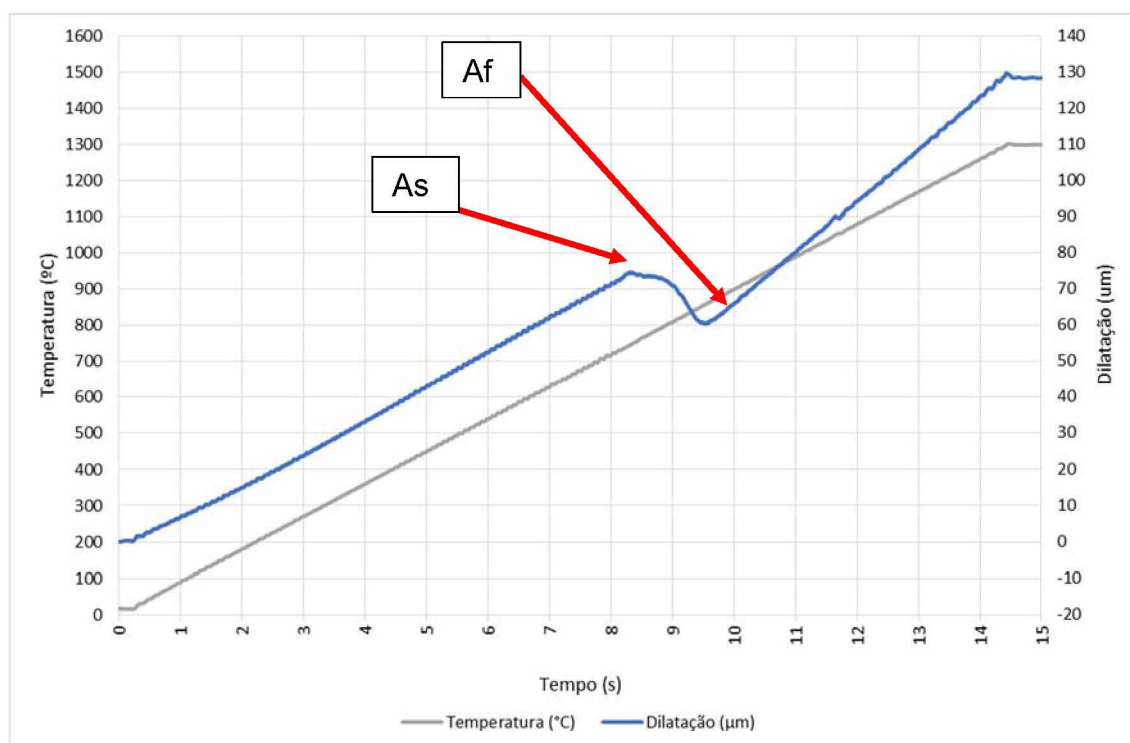


Figura A.1.10 – Aquecimento da simulação térmica através de dilatometria para  $t_{8/5} = 416$  s (ensaio inicial), onde sobre a curva de dilatação, As indica o início da transformação da austenita, Af indica fim da austenitização

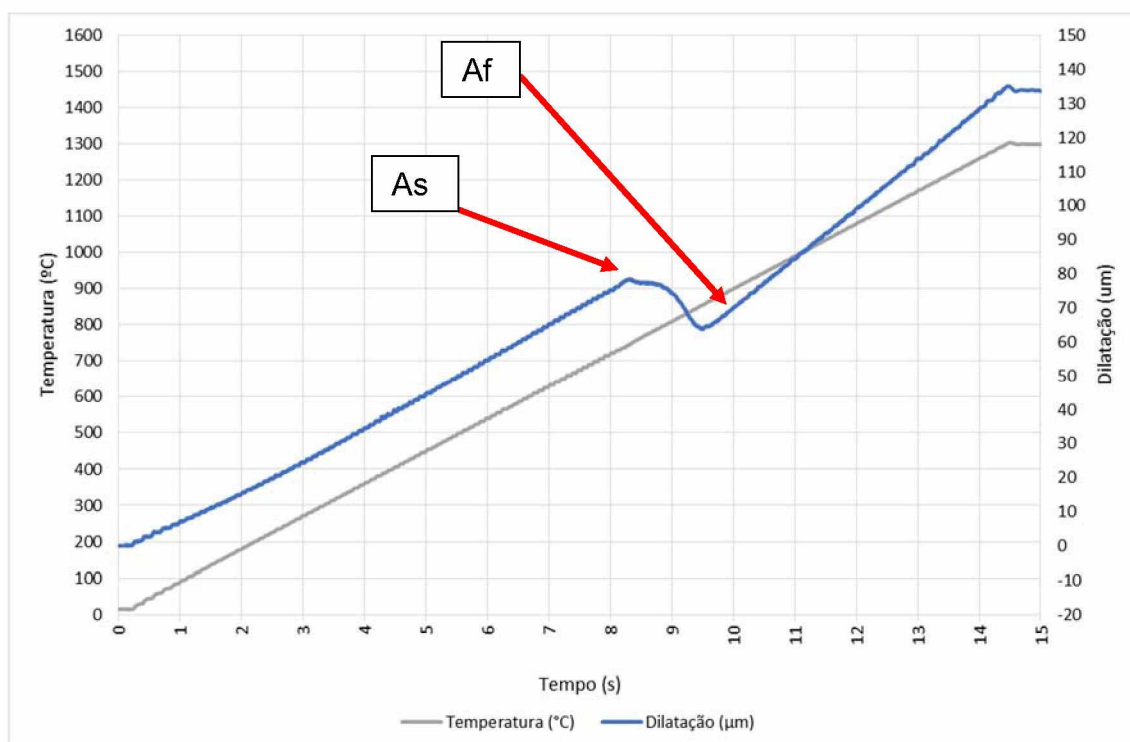


Figura A.1.11 – Aquecimento da simulação térmica através de dilatometria para  $t_{8/5} = 832$  s (ensaio inicial), onde sobre a curva de dilatação, As indica o início da transformação da austenita, Af indica fim da austenitização

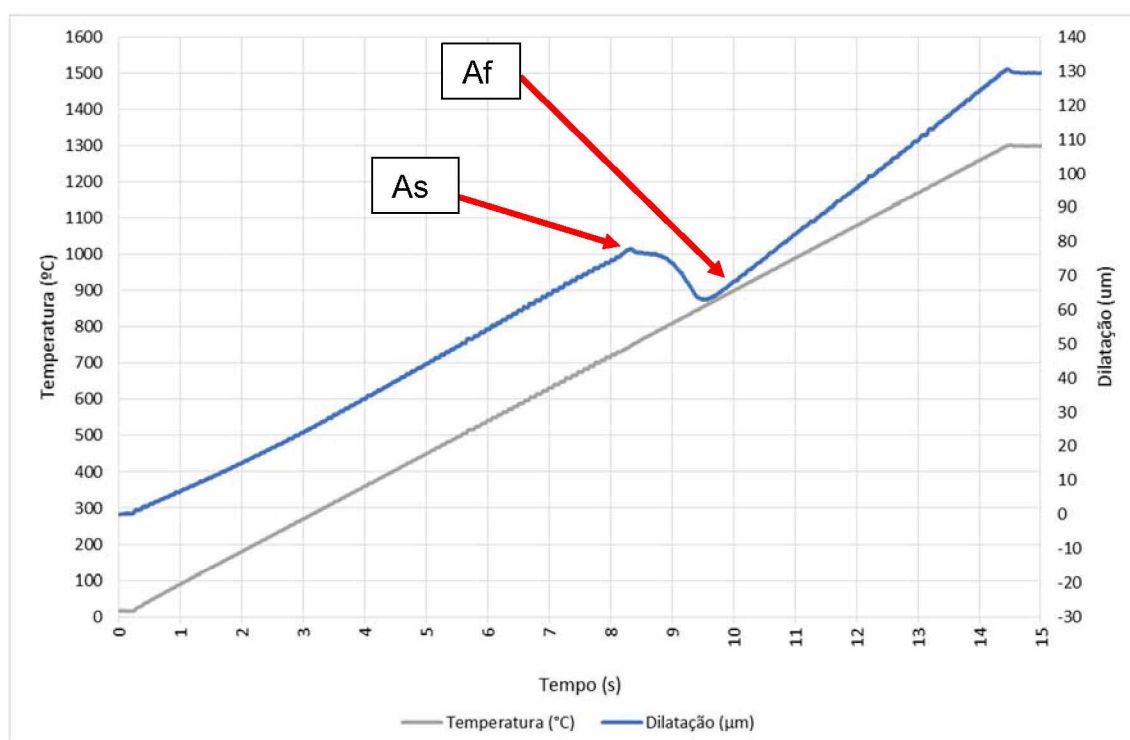


Figura A.1.12 – Aquecimento da simulação térmica através de dilatometria para  $t_{8/5} = 1680$  s (ensaio inicial), onde sobre a curva de dilatação, As indica o início da transformação da austenita, Af indica fim da austenitização

Em relação as várias curvas de aquecimento, é possível notar que houve estabilidade em todas as amostras simuladas, apresentando tempo de aquecimento, início e fim de transformação austenítica e curva de dilatação similar. As temperaturas  $Ac_1$  e  $Ac_3$  para este aço foram desta forma confirmados.

## 1.2 Curvas de resfriamento

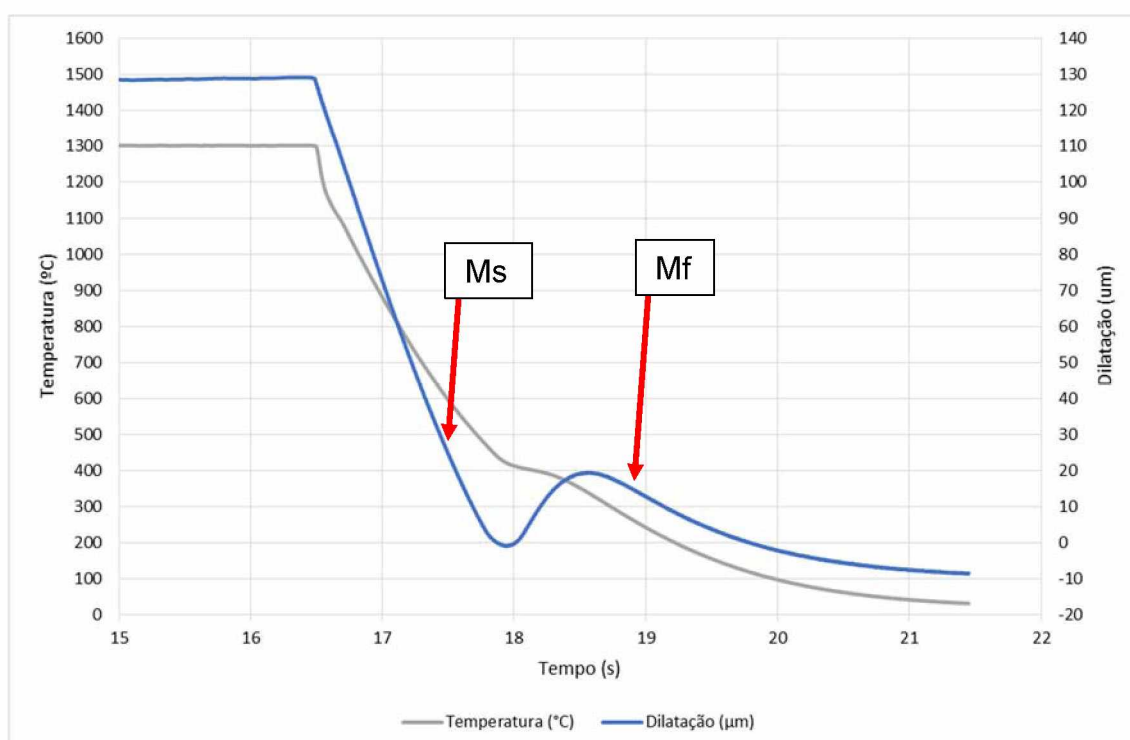


Figura A.1.13 – Resfriamento da simulação térmica através de dilatometria para  $t_{8/5} = 0,6$  s (ensaio inicial), onde sobre a curva de dilatação, Ms indica o início da transformação da martensita, Mf indica fim da transformação da martensita

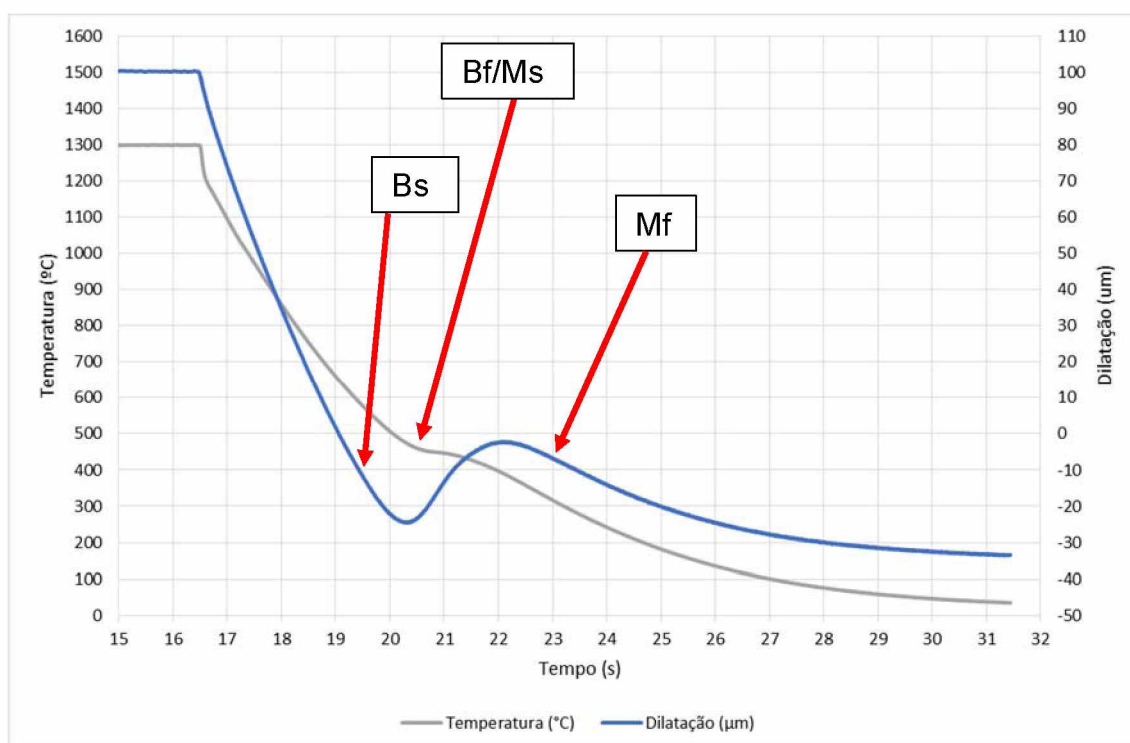


Figura A.1.14 – Resfriamento da simulação térmica através de dilatometria para  $t_{8/5} = 1,8$  s (ensaio inicial), onde sobre a curva de dilatação, Bs indica o início da transformação da bainita, Bf/Ms indica o fim da transformação da bainita e início da transformação da martensita, Mf indica fim da transformação da martensita



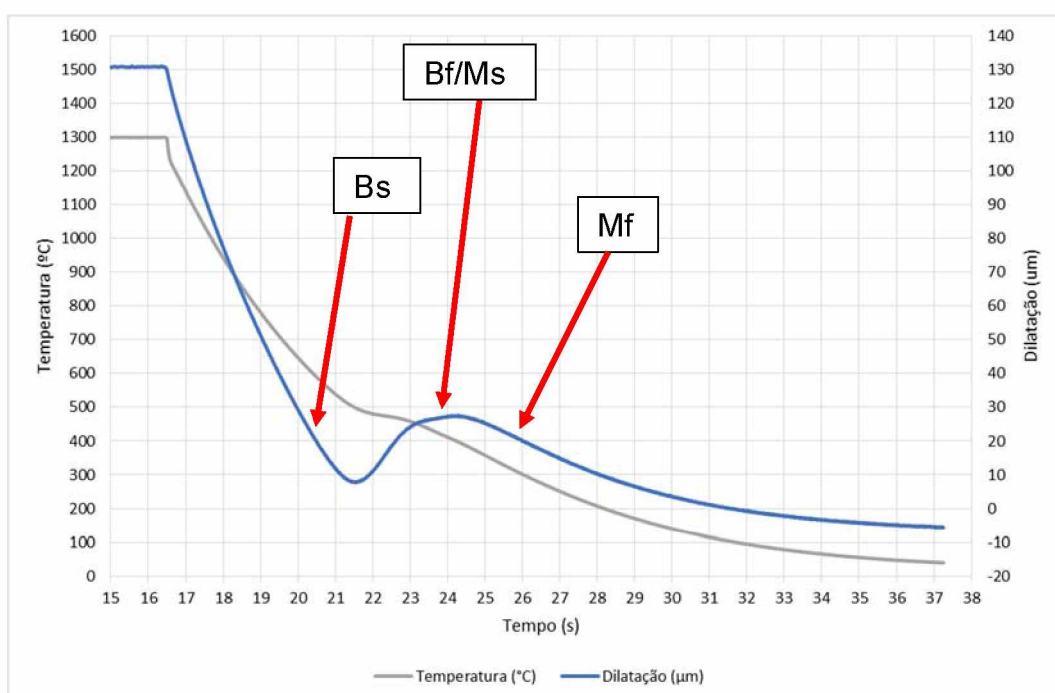


Figura A.1.15 – Resfriamento da simulação térmica através de dilatometria para  $t_{8/5} = 2,6$  s (ensaio inicial), onde sobre a curva de dilatação, Bs indica o início da transformação da bainita, Bf/Ms indica o fim da transformação da bainita e início da transformação da martensita, Mf indica fim da transformação da martensita

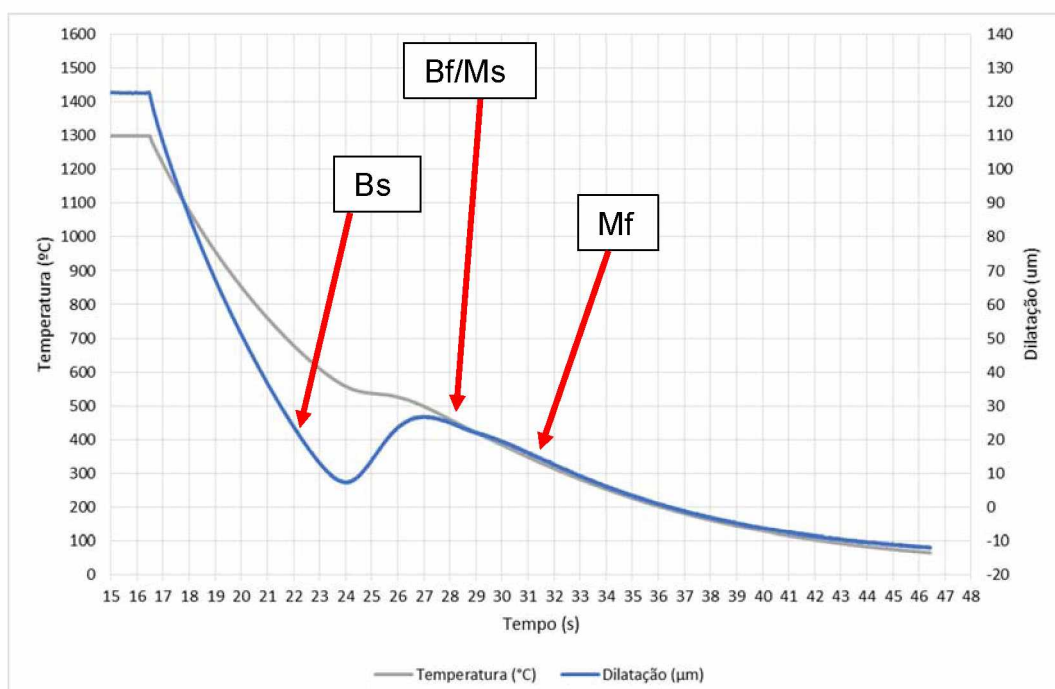


Figura A.1.16 – Resfriamento da simulação térmica através de dilatometria para  $t_{8/5} = 6,4$  s (ensaio inicial), onde sobre a curva de dilatação, Bs indica o início da transformação da bainita, Bf/Ms indica o fim da transformação da bainita e início da transformação da martensita, Mf indica fim da transformação da martensita

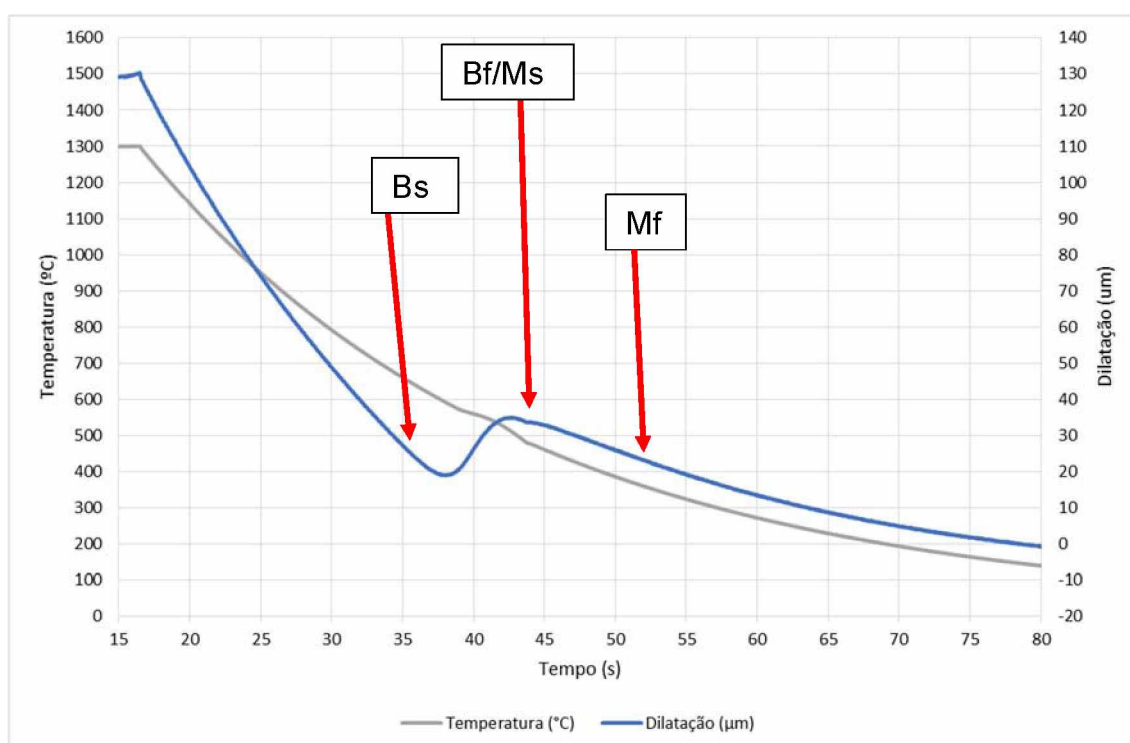


Figura A.1.17 – Resfriamento da simulação térmica através de dilatometria para  $t_{8/5} = 13,3$  s (ensaio inicial), onde sobre a curva de dilatação, Bs indica o início da transformação da bainita, Bf/Ms indica o fim da transformação da bainita e início da transformação da martensita, Mf indica fim da transformação da martensita

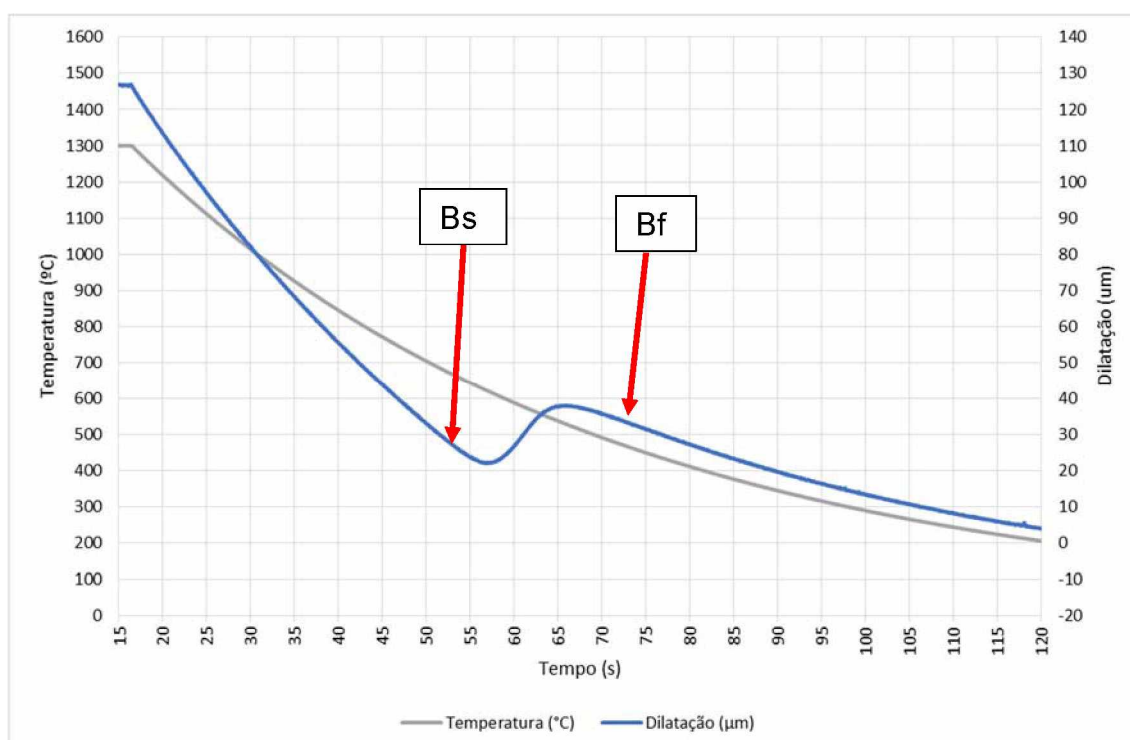


Figura A.1.18 – Resfriamento da simulação térmica através de dilatometria para  $t_{8/5} = 26,1$  s (ensaio inicial), onde sobre a curva de dilatação, Bs indica o início da transformação da bainita, Bf indica o fim da transformação da bainita

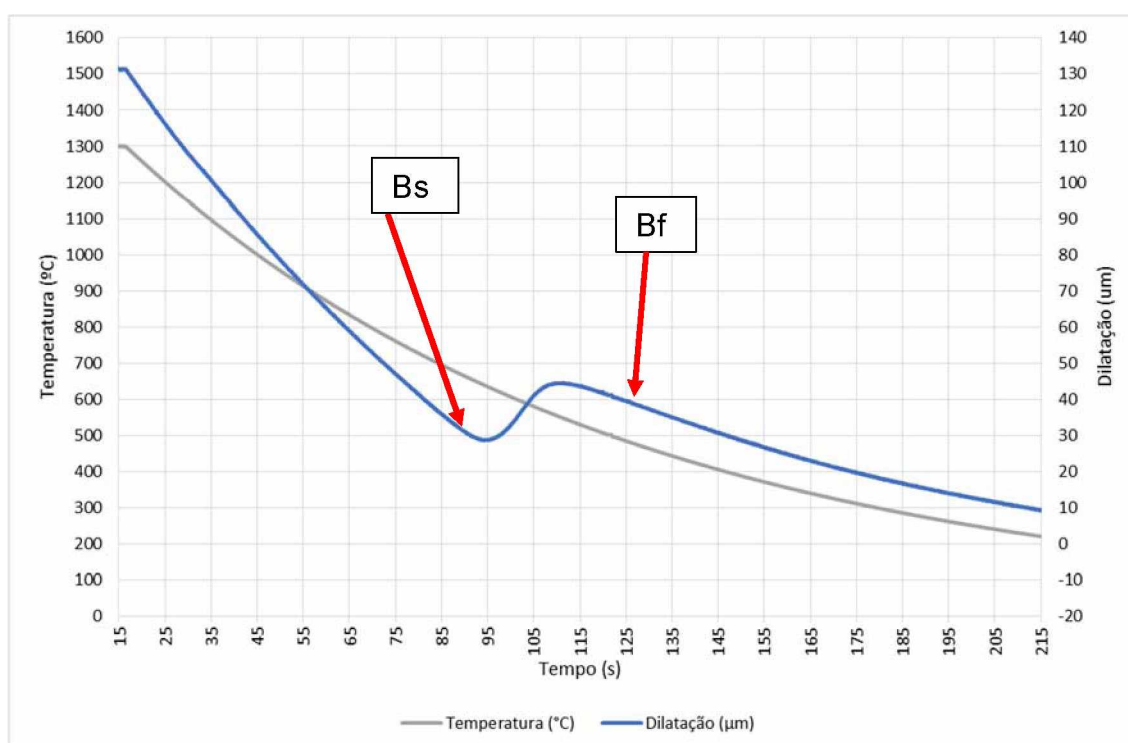


Figura A.1.19 – Resfriamento da simulação térmica através de dilatometria para  $t_{8/5} = 52,0$  s (ensaio inicial), onde sobre a curva de dilatação, Bs indica o início da transformação da bainita, Bf indica o fim da transformação da bainita

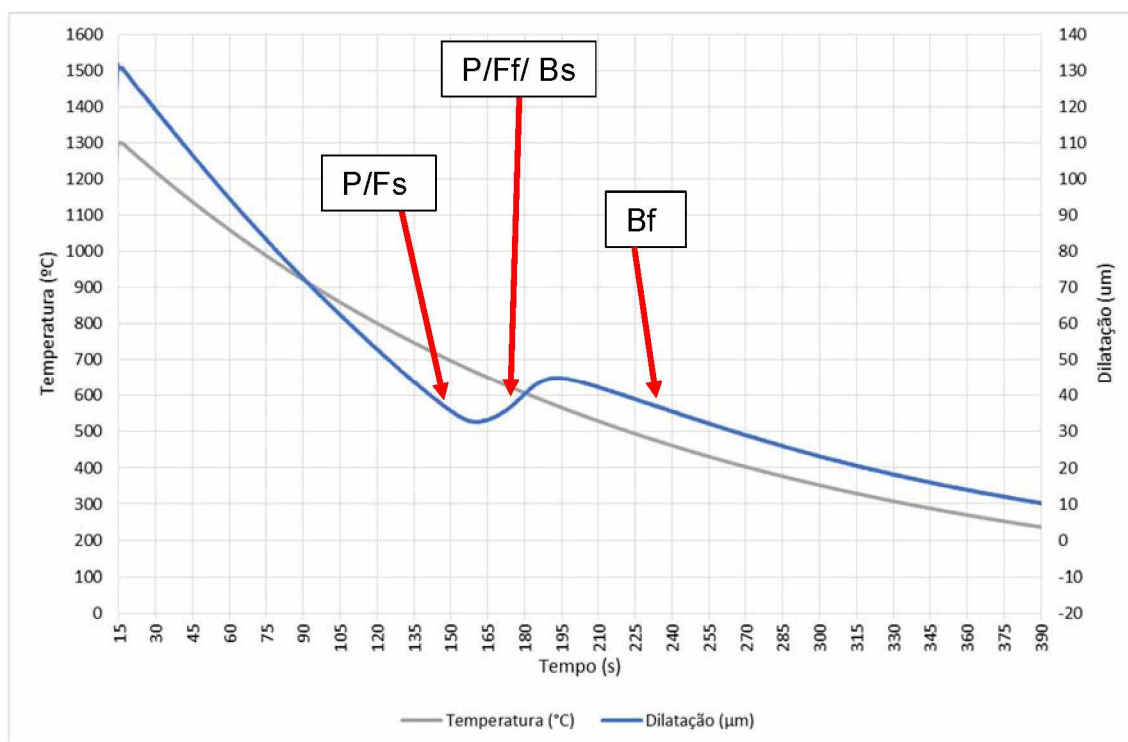


Figura A.1.20 – Resfriamento da simulação térmica através de dilatometria para  $t_{8/5} = 104$  s (ensaio inicial), onde sobre a curva de dilatação, P/Fs indica o início de transformação da Perlita/Ferrita, P/Ff indica o fim de transformação da Perlita/Ferrita, Bs indica o início da transformação da bainita, Bf indica o fim da transformação da bainita

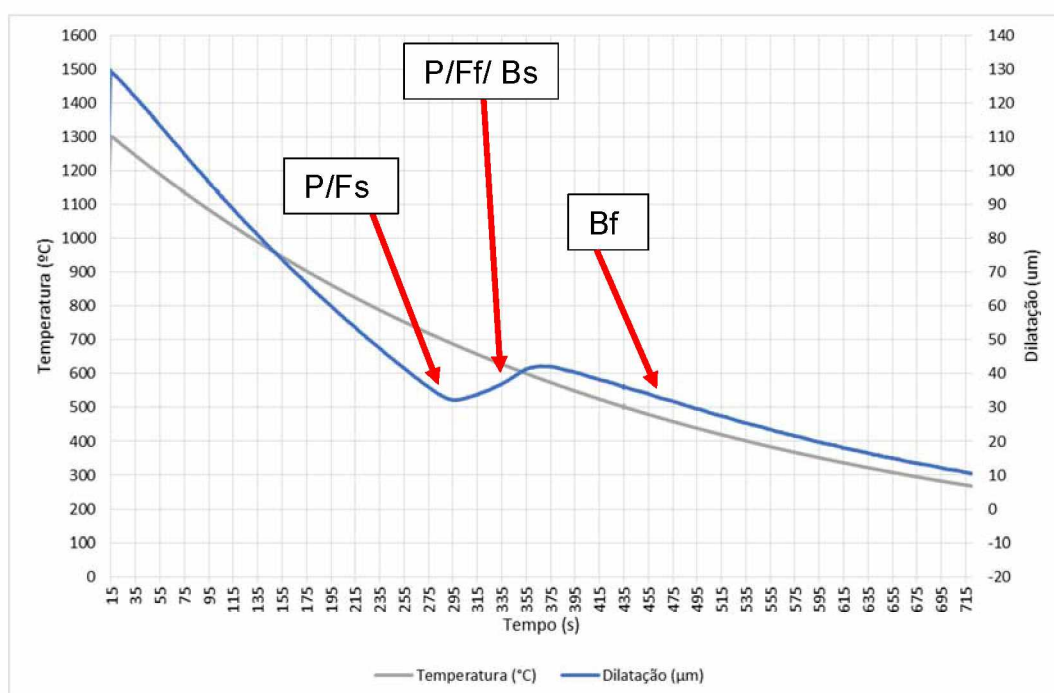


Figura A.1.21 – Resfriamento da simulação térmica através de dilatometria para  $t_{8/5} = 208$  s (ensaio inicial), onde sobre a curva de dilatação, P/Fs indica o início de transformação da Perlita/Ferrita, P/Ff indica o fim de transformação da Perlita/Ferrita, Bs indica o início da transformação da bainita, Bf indica o fim da transformação da bainita

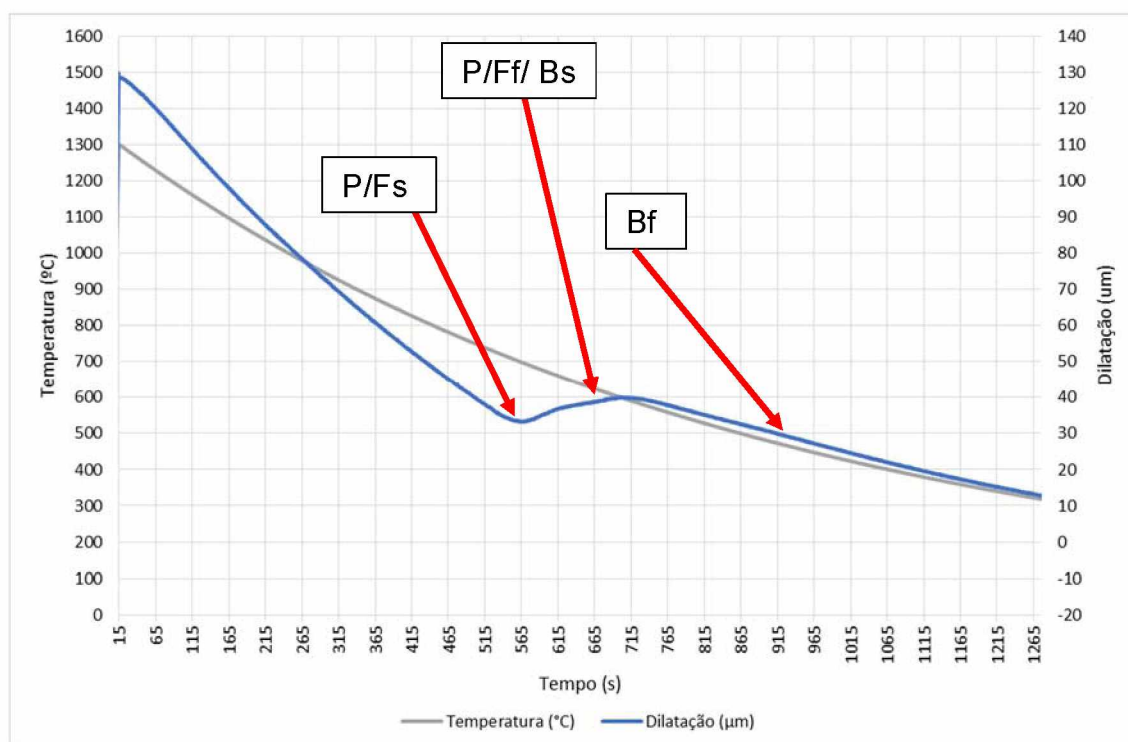


Figura A.1.22 – Resfriamento da simulação térmica através de dilatometria para  $t_{8/5} = 416$  s (ensaio inicial), onde sobre a curva de dilatação, P/Fs indica o início de transformação da Perlita/Ferrita, P/Ff indica o fim de transformação da Perlita/Ferrita, Bs indica o início da transformação da bainita, Bf indica o fim da transformação da bainita

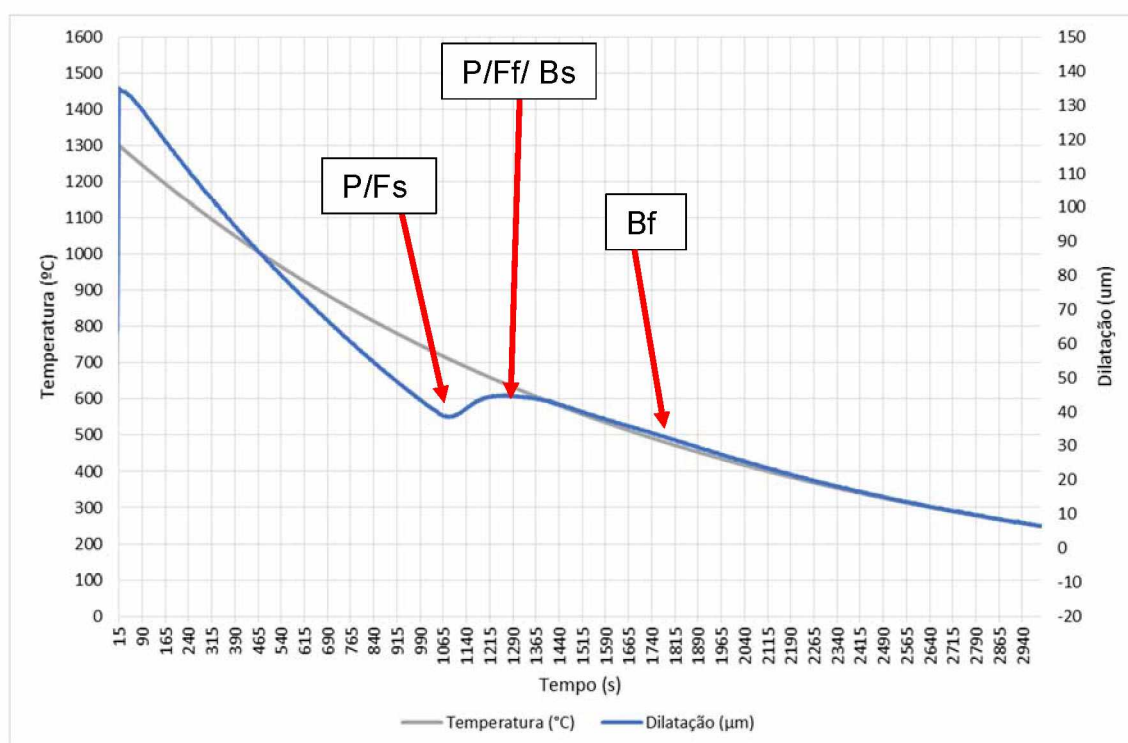


Figura A.1.23 – Resfriamento da simulação térmica através de dilatometria para  $t_{8/5} = 832$  s (ensaio inicial), onde sobre a curva de dilatação, P/Fs indica o início de transformação da Perlita/Ferrita, P/Ff indica o fim de transformação da Perlita/Ferrita, Bs indica o início da transformação da bainita, Bf indica o fim da transformação da bainita

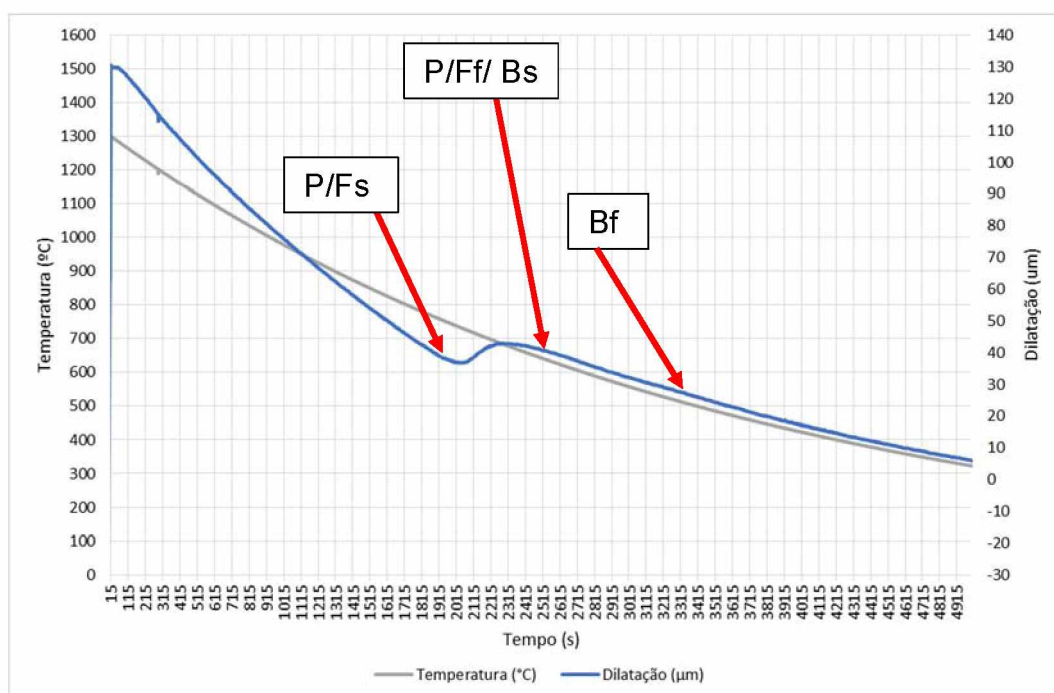


Figura A.1.24 – Resfriamento da simulação térmica através de dilatometria para  $t_{8/5} = 1680$  s (ensaio inicial), onde sobre a curva de dilatação, P/Fs indica o início de transformação da Perlita/Ferrita, P/Ff indica o fim de transformação da Perlita/Ferrita, Bs indica o início da transformação da bainita, Bf indica o fim da transformação da bainita



## 2 Curvas de transição dúctil-frágil ensaio Gleeble

As figuras A.2.1 a A.2.8 demonstra os resultados detalhados do ensaio Charpy entalhe em V realizado nas amostras do aço após simulação térmica (ensaio Gleeble).

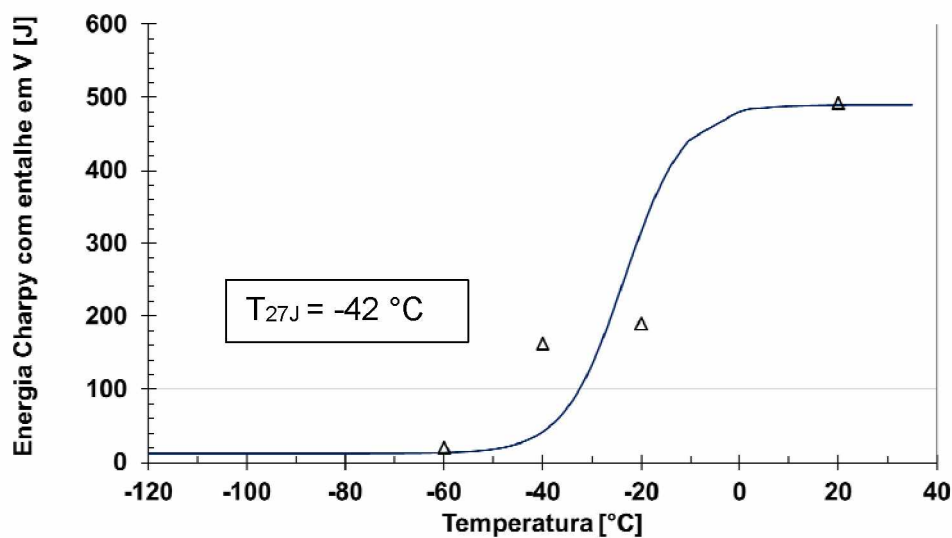


Figura A.2.1 – Curva de transição dúctil-frágil por ensaio Charpy V em amostra (ensaio Gleeble) com tempo de resfriamento  $t_{8/5} = 4$  s

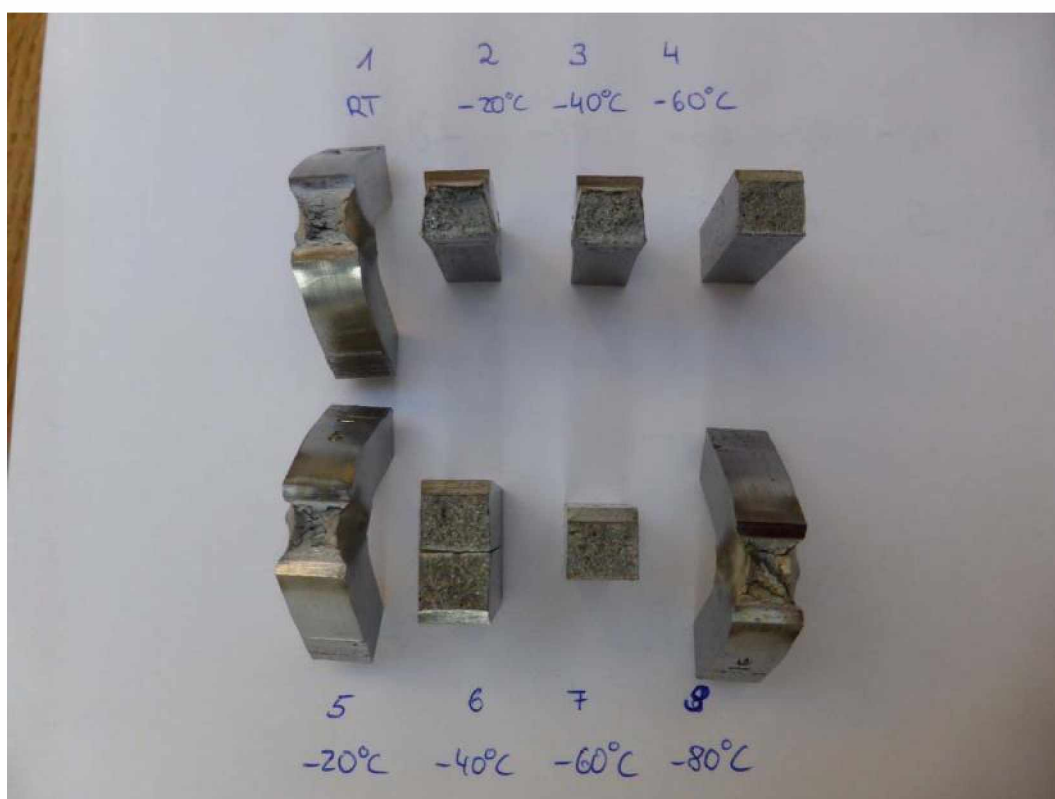


Figura A.2.2 – Fraturas após ensaio Charpy V em amostras (ensaio Gleeble) com tempo de resfriamento  $t_{8/5} = 4$  s

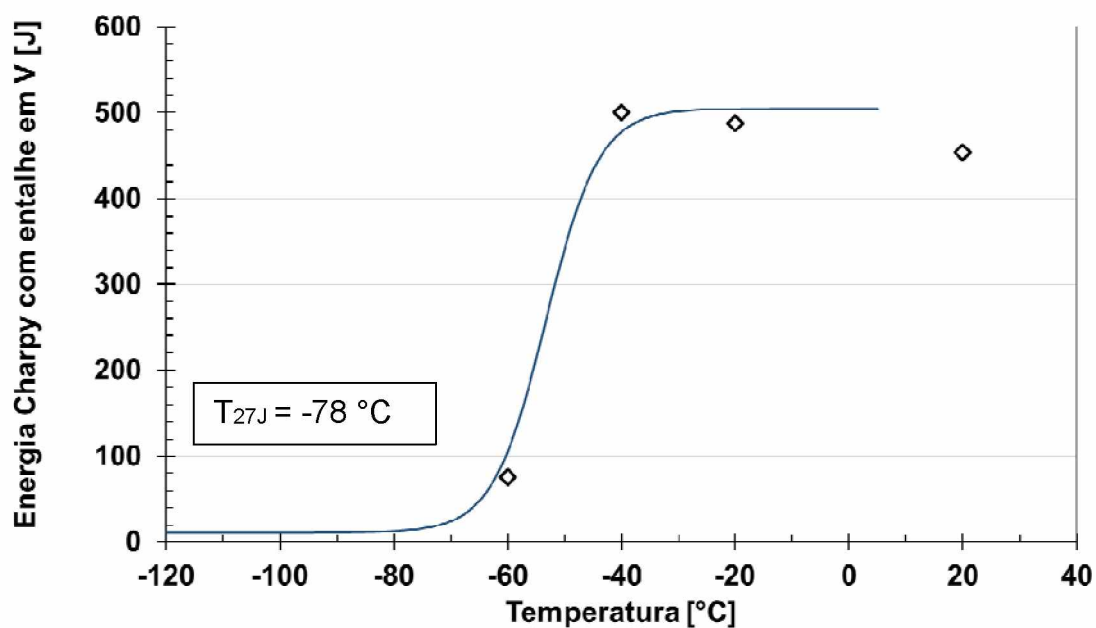


Figura A.2.3 – Curva de transição dúctil-frágil por ensaio Charpy V em amostra (ensaio Gleeble) com tempo de resfriamento  $t_{8/5} = 10$  s

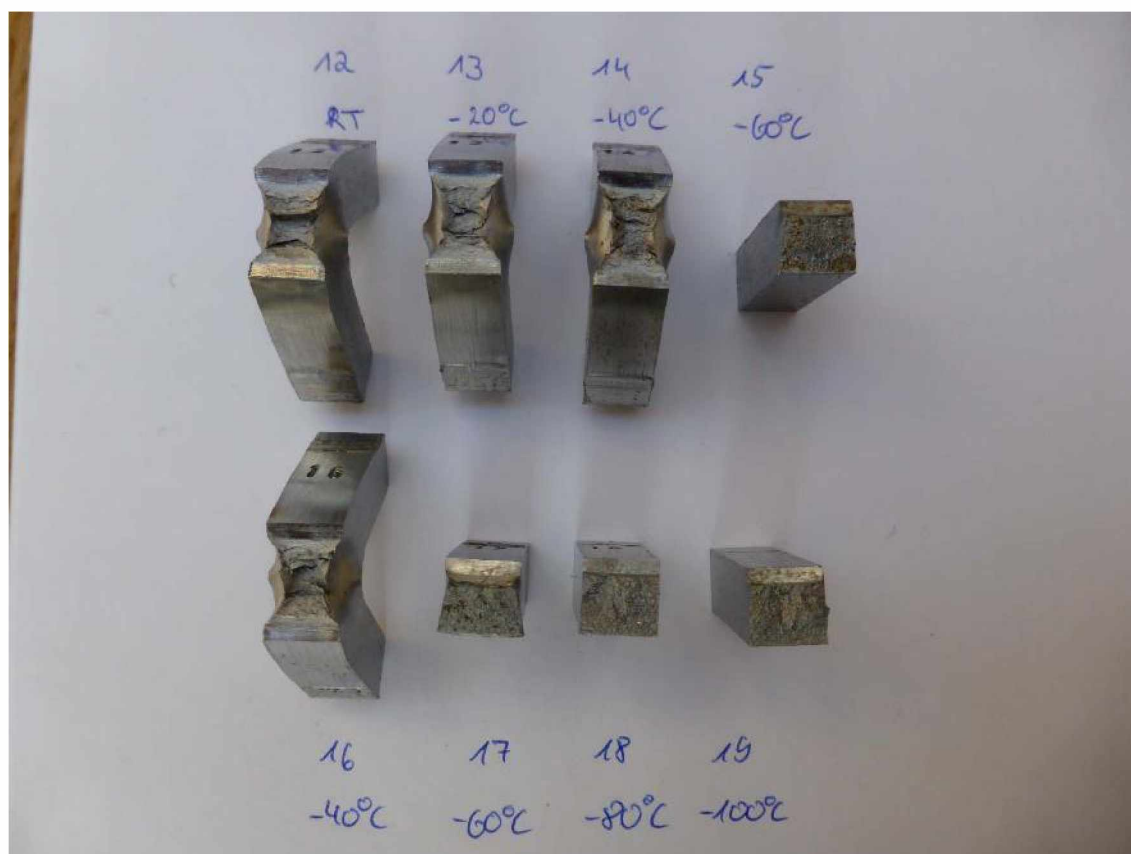


Figura A.2.4 – Fraturas após ensaio Charpy V em amostras (ensaio Gleeble) com tempo de resfriamento  $t_{8/5} = 10$  s

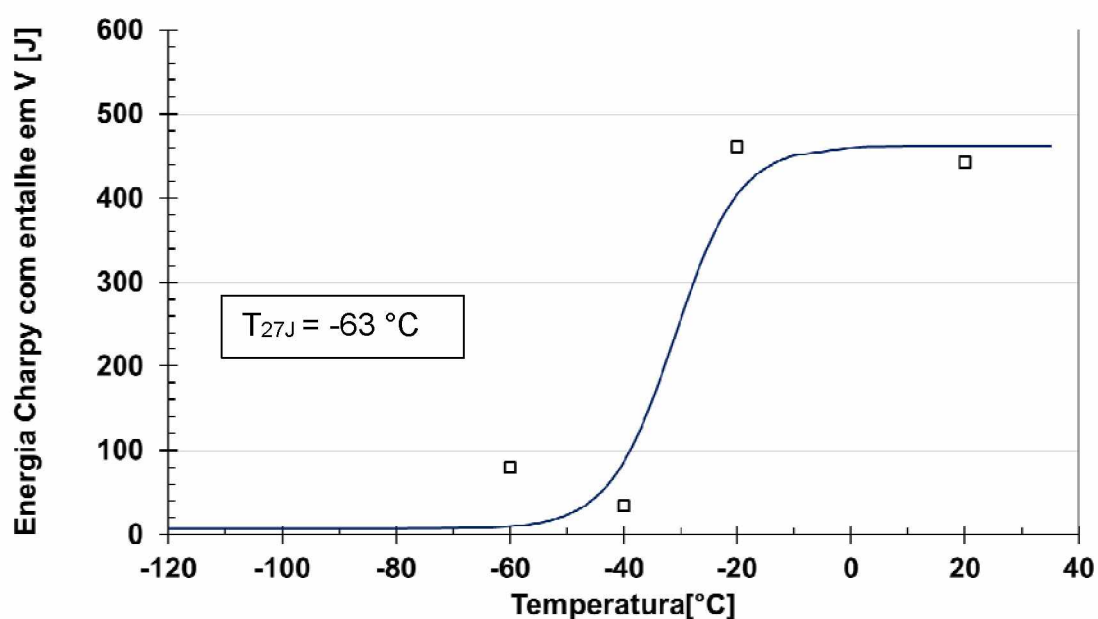


Figura A.2.5 – Curva de transição dúctil-frágil por ensaio Charpy V em amostra (ensaio Gleeble) com tempo de resfriamento  $t_{8/5} = 25$  s

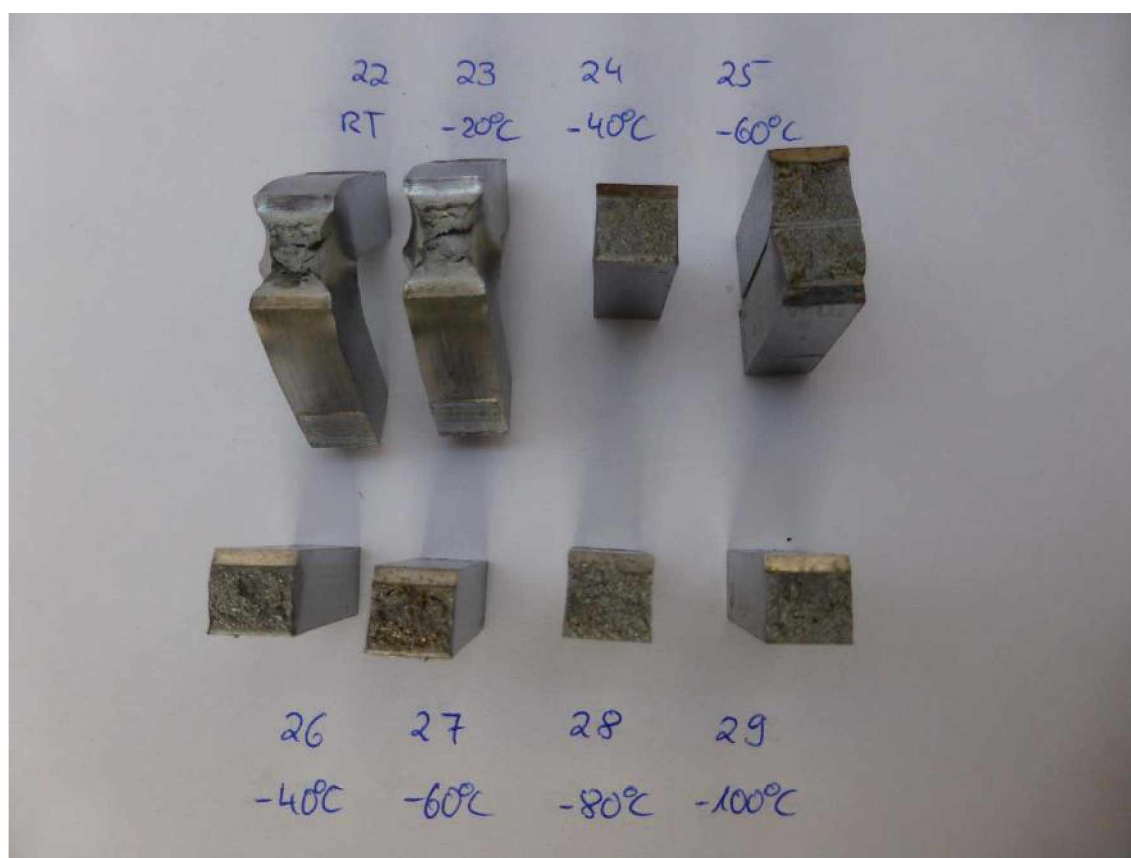


Figura A.2.6 – Fraturas após ensaio Charpy V em amostras (ensaio Gleeble) com tempo de resfriamento  $t_{8/5} = 25$  s

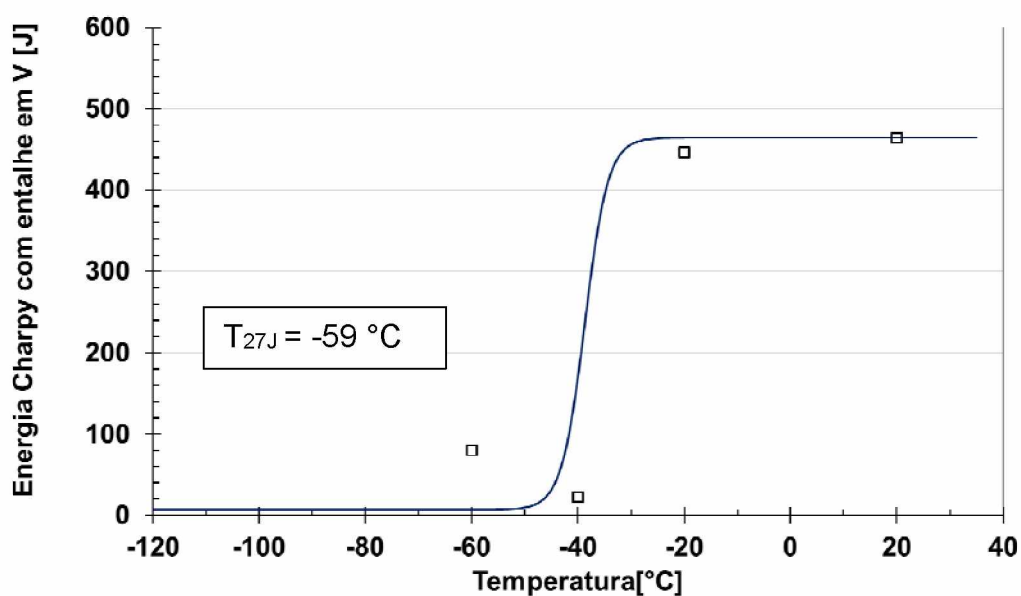


Figura A.2.7 – Curva de transição dúctil-frágil por ensaio Charpy V em amostra (ensaio Gleeble) com tempo de resfriamento  $t_{8/5} = 70$  s



Figura A.2.8 – Fraturas após ensaio Charpy V em amostras (ensaio Gleeble) com tempo de resfriamento  $t_{8/5} = 70$  s

### 3 Ensaio de tração em seção reduzida (ensaio Gleeble)

A tabela A.3.1 demonstra os resultados detalhados da caracterização mecânica realizada nas amostras do aço após simulação térmica (ensaio Gleeble). A Figura A.3.1 ilustra as amostras utilizadas no ensaio.

Tabela A.3.1 Caracterização mecânica das amostras do aço (ensaio Gleeble) para os diferentes tempos de resfriamento entre 800 e 500 °C

Corpo de Prova	$S_0$	$L_0$	$R_{p0,2}$	$R_m$	$A_g$	$A_{10mm}$
	mm <sup>2</sup>	mm	MPa	MPa	%	%
t8/5=4s- Pr.1	28,27	10,09	740	759	1,88	12,1
t8/5=10s- Pr.2	28,94	10,2	529	688	6,2	17
t8/8=25s- Pr.3	28,94	9,84	468	606	9,59	45,4
t8/5=70s- Pr.4	28,65	9,96	434	589	10,07	46,3

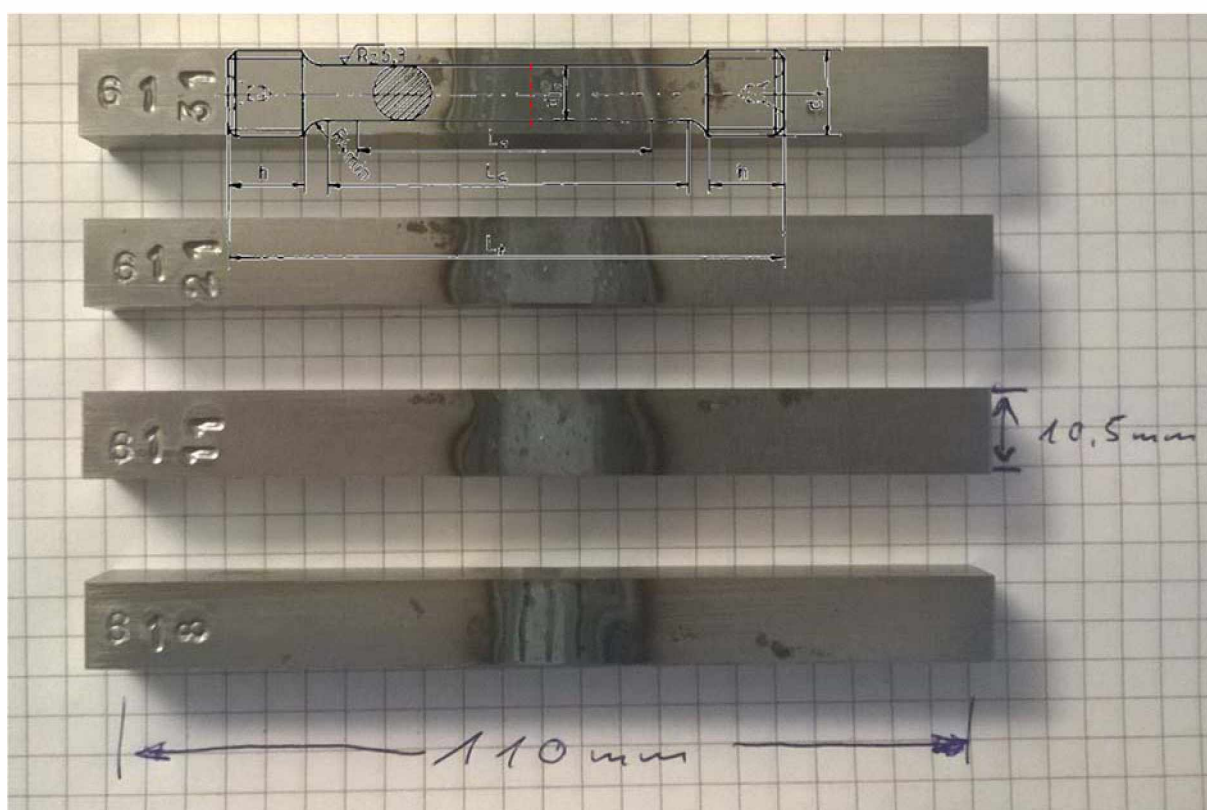


Figura A.3.1 –Amostras do aço (ensaio Gleeble) caracterizadas mecanicamente por ensaio de tração em seção reduzida.

As rupturas ocorreram na região afetada pelo ciclo térmico.



## ANEXO I

### PROJETO DE NOVO PRÉDIO DE SECAGEM (CBMM, ARAXÁ, MG)

A CBMM em sua unidade de Araxá tem procurado evoluir na engenharia de estruturas industriais através da utilização de aços de design mais avançado continuamente. Esta forma de projetar tem demonstrado economias interessantes como descrito por Silvestre et al. (2012) no projeto do prédio da nova unidade de Sinterização instalada em Araxá com redução de 22% de material que corresponde a 78,7 toneladas de aço. Este resultado foi possível com a utilização de um aço de alta resistência baixa liga com nióbio que resultou em melhoria nas capacidades mecânicas do aço aumentando em 39% o limite de escoamento, 23% o limite de resistência à tração e em 55% a tenacidade.

Para 2015, um novo desafio foi lançado em reduzir ainda mais o peso das estruturas. Sendo projetado pela equipe de engenharia um edifício de secagem e separação magnética de concentrado refinado com utilização mista de aço microligado ao nióbio de especificação ASTM A572 Grau 65 (com limite de escoamento de 450 MPa – 65 ksi e resistência à tração de 550 MPa – 80 ksi) e ASTM A572 Grau 50 (com limite de escoamento de 345 MPa – 50 ksi e resistência à tração de 450 MPa – 65 ksi).

Neste contexto foram definidos os seguintes critérios para o uso dos materiais na estrutura:

- Para as peças que tiveram como critério de dimensionamento o estado limite de serviço (flecha por exemplo) o uso do grau 65 não faz diferença pois o aumento do limite de escoamento não influencia na deformação;
- Perfis laminados não utilizaram grau 65 pois não demandaram quantidade suficiente para compra mínima. O baixo uso em laminados se deu pelo fato de que o mesmo perfil em grau 50 atendeu o projeto e de não haver em território nacional produção de laminados neste grau de resistência de forma comercial;

- Boa parte do uso de grau 65 se deu nos pórticos, pois obteve-se vantagem devido aos esforços elevados e bom nível de travamento interno proporcionado pelas plataformas do edifício;
- Nas plataformas obteve-se vantagem para utilização do grau 65 em vigas principais com seções acima de 600mm de altura;
- O projeto utilizou, em ordem de prioridade, perfis soldados grau 65, laminados grau 50, soldados grau 50;

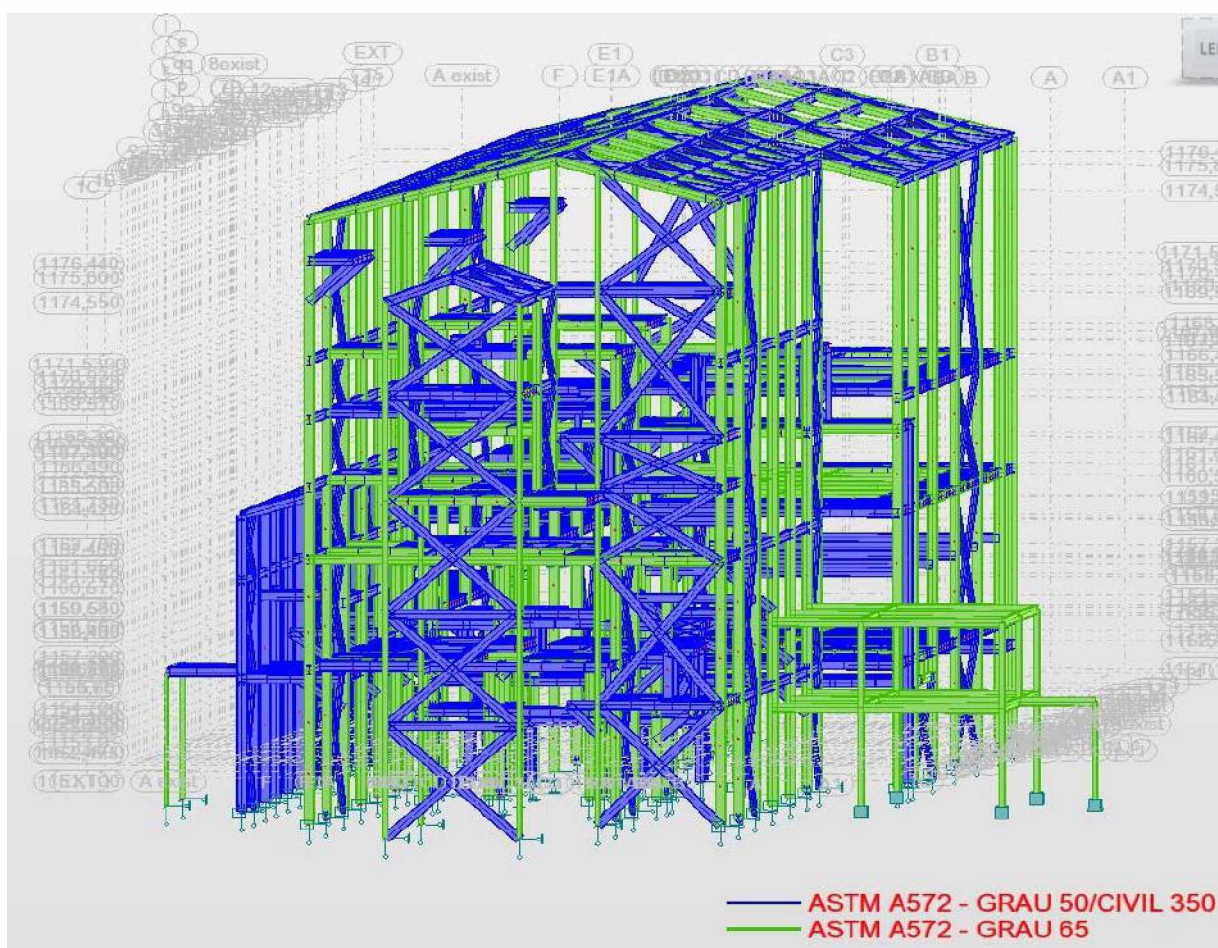


Figura I.1 – Vista frontal do prédio projetado com estrutura mista

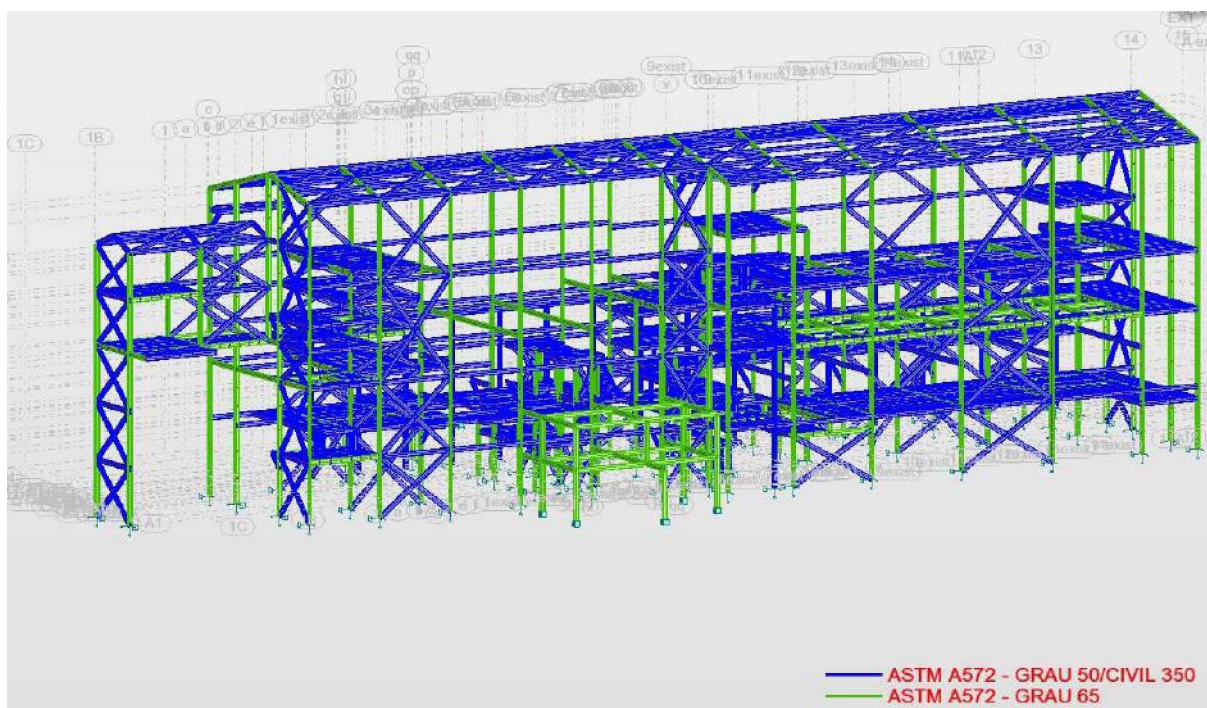


Figura I.2 – Vista lateral do prédio projetado com estrutura mista

Com este projeto obteve-se uma redução de peso pela aplicação do aço ASTM A572 Grau 65, comparando-se a uma estrutura completa em aço ASTM A572 Grau 50, de aproximadamente 10% (equivalente a cerca de 103 toneladas), considerando somente a aplicação em estruturas principais. O aumento do preço unitário do aço ASTM A572 Grau 65 em relação ao ASTM A572 Grau 50 é de aproximadamente 7%, demonstrando economia final do projeto de cerca de 7% no custo dos aços especiais utilizados. Haverá ainda uma redução de aproximadamente 9% em energia consumida e emissões de gases de efeito estufa.

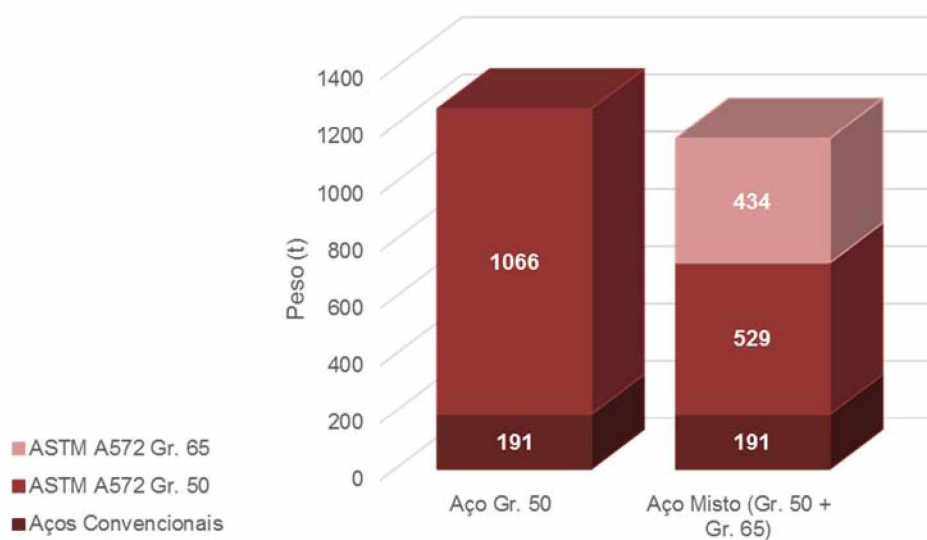


Figura I.3 – Peso dos diferentes aços utilizados no projeto

No projeto os pontos de maior criticidade serão os das seguintes junções conforme projeto estrutural realizado:

- Para a junção realizada em processo de soldagem SAW (arco submerso) deverá ser atendido os esforços de 65 ksi sendo a junção realizada em dois aços de mesmo grau representados com o maior perfil na Figura I.4;

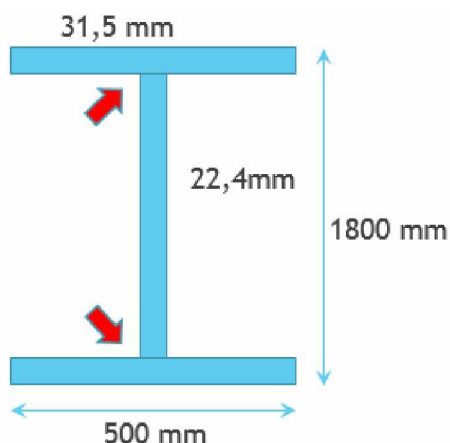


Figura I.4 – Perfil soldado mais crítico em processo SAW

- Para a junção realizada em processo de soldagem FCAW (arame tubular), ocorrerá principalmente a soldagem de materiais dissimilares com penetração total, sendo um a base retangular em aço ASTM 572 Grau 50 e outro o perfil estrutural em aço ASTM 572 Grau 65, representado na figura I.5.

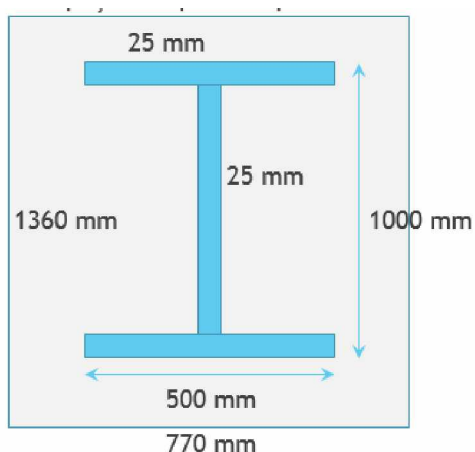


Figura I.5 – Perfil soldado mais crítico em processo FCAW

- Pequenos reparos em campo poderão ser realizados no processo de (Eletrodo revestido).



## ANEXO II

### FABRICAÇÃO DO AÇO SINCROON PELA USIMINAS

De acordo com informações disponibilizadas no site de sua empresa, a Usiminas detalha o processamento térmico da linha Sincron da seguinte forma:

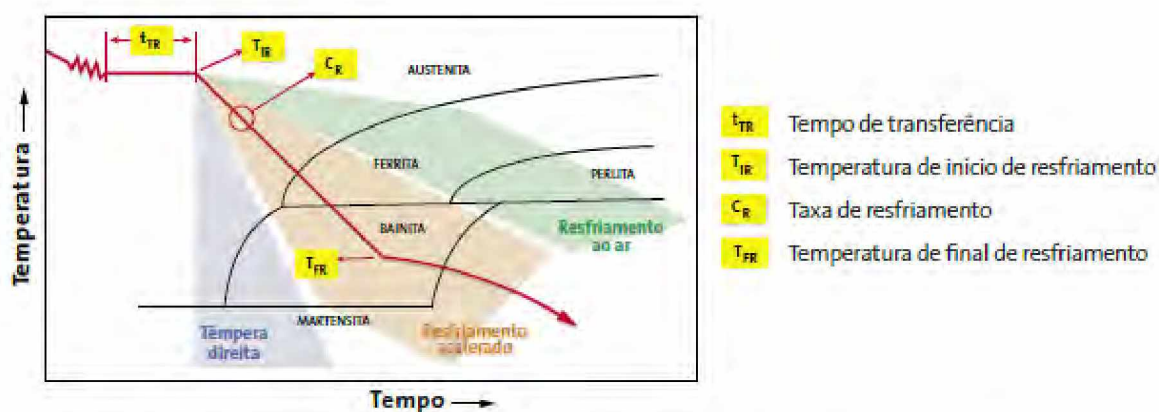
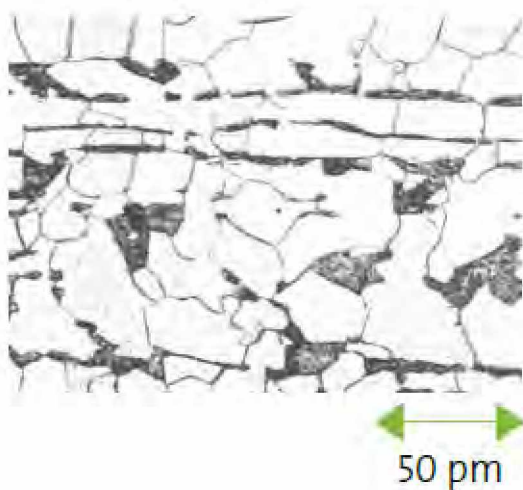


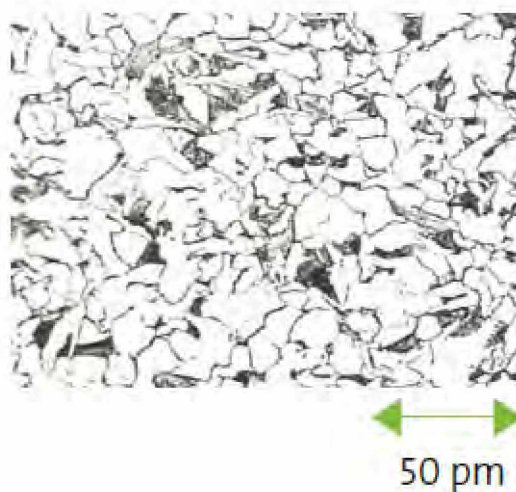
Gráfico 1 – Curvas de resfriamento do processo CLC no equipamento de resfriamento acelerado da Usiminas.

Microestrutura resultante:

Laminação convencional



CLC





A fabricação é dividida em duas etapas que são detalhadas a seguir:

### 1ª etapa: fabricação do aço líquido e lingotamento de placas

O fluxo de fabricação de aço líquido e o lingotamento de placas na produção dos aços da linha *Sincron* pelo processo CLC estão demonstrados na Figura 1.

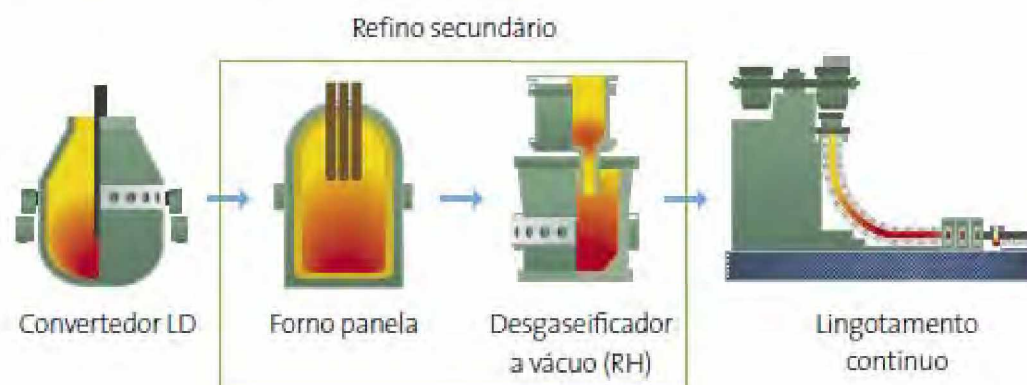


Figura 1 - Fluxo de fabricação de aço líquido e lingotamento de placas dos aços da série *Sincron*.

**Convertedor LD:** a sucata e o ferro-gusa são carregados no convertedor LD, e, em seguida, é injetado oxigênio, através de uma lança, para a oxidação das impurezas, paralelamente às adições de ligas para a obtenção da composição química desejada.

**Forno panela:** o aço líquido é tratado no forno panela, onde se estabiliza a temperatura e são feitas adições para ajuste de composição química e dessulfuração do aço.

**Desgaseificador a vácuo (RH):** a panela com aço líquido é posicionada no equipamento RH em um ambiente a vácuo, onde se promove a desidrogenação do aço.

**Lingotamento contínuo:** o aço tratado é vazado em um distribuidor que alimenta os moldes para o lingotamento com controles especiais, com o intuito de minimizar a ocorrência de segregação central durante a solidificação.

**Acabamento das placas:** a superfície das placas e a qualidade interna são inspecionadas e defeitos superficiais são eliminados pelo processo de escarificação. A seguir, as placas são enviadas para a linha de laminação de chapas grossas.

## 2ª etapa: laminação controlada + resfriamento acelerado

O fluxo de laminação de chapas grossas da série *Sincron* é demonstrado na Figura 2.



Figura 2 – Fluxo de laminação das chapas grossas da série *Sincron* da Usiminas – Usina de Ipatinga.

**Forno de reaquecimento:** as placas são inicialmente introduzidas em fornos de reaquecimento para atingirem a temperatura adequada de laminação e para a dissolução dos precipitados formados na aciaria. Nesses fornos, o controle e a uniformidade de temperatura em todas as direções da placa são fundamentais para a garantia de forma e propriedades mecânicas requeridas no produto final.

**Laminação de desbaste e acabamento:** processo de laminação controlada em que a placa é laminada na fase de desbaste acima da temperatura de não recristalização do constituinte austenita ( $T_{nr}$ ) e, posteriormente, laminada abaixo dessa temperatura até a espessura final requerida pelo cliente, promovendo significativo refino de grão.

**Desempenadeira a quente:** antes do laminado ser enviado ao resfriamento acelerado, o material passa em uma desempenadeira a quente para a melhoria da forma, a fim de que o resfriamento seja o mais uniforme possível em todas as direções da chapa.

**Resfriamento acelerado:** etapa na qual a chapa é resfriada rapidamente com água, com a finalidade de controlar a microestrutura do aço e, assim, atingir as propriedades mecânicas requeridas na especificação do produto final.

**Desempenadeira a frio e prensa:** equipamentos complementares *off-line* utilizados para correção de forma, permitindo o atendimento a requisitos rigorosos de planicidade.

**Vantagem no uso do processo CLC, exclusividade dos aços Sincron:**

Conforme mostra o Gráfico 2, para um determinado nível de resistência mecânica, o carbono equivalente (Ceq) pode ser reduzido entre 0,05%–0,15%, utilizando-se o processo CLC em comparação com o processo convencional. Além disso, para uma determinada especificação de Ceq, consegue-se obter um aumento de resistência mecânica da ordem de 100 MPa–150 MPa, com a escolha do processo CLC como rota de laminação.

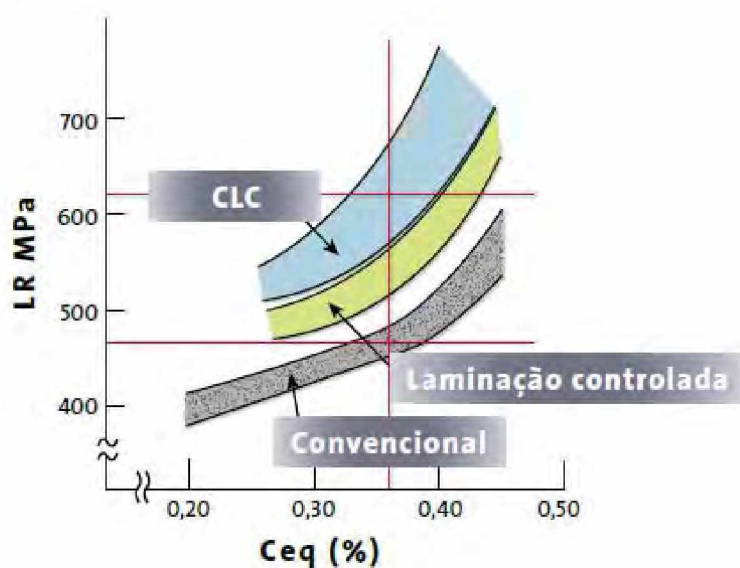


Gráfico 2 – Relação entre limite de resistência (MPa) versus carbono equivalente (Ceq) por processo de laminação.



### Energia absorvida na ZTA (Zona Termicamente Afetada)

- Os aços navais da linha *Sincron* apresentam elevada energia absorvida (vE -20°C na ZTA, mesmo com elevados aportes térmicos de soldagem), conforme Gráfico 3.
- Os aços navais convencionais (tratamento térmico: normalização) ficam limitados a aportes térmicos de soldagem da ordem de 50 kJ/cm.

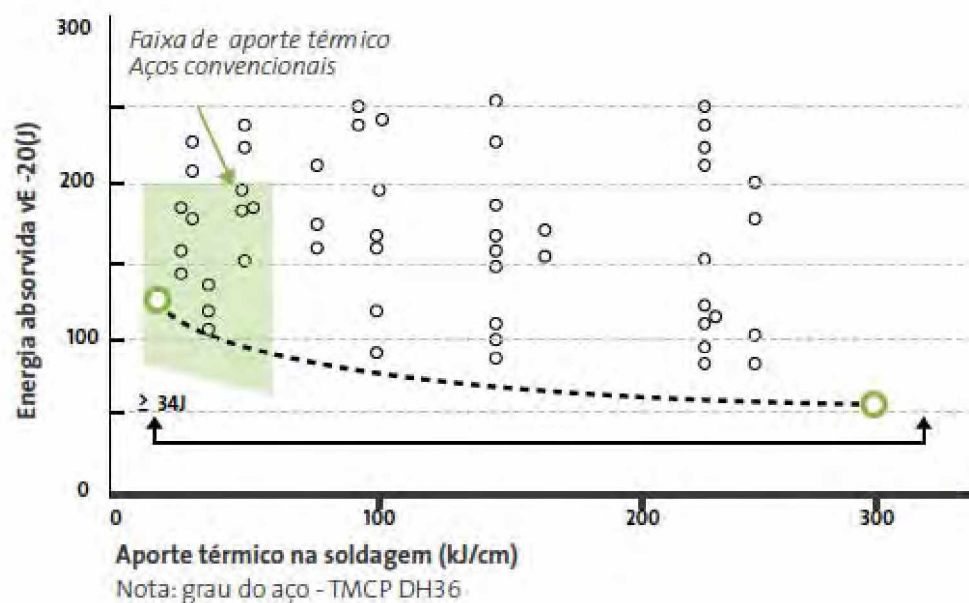


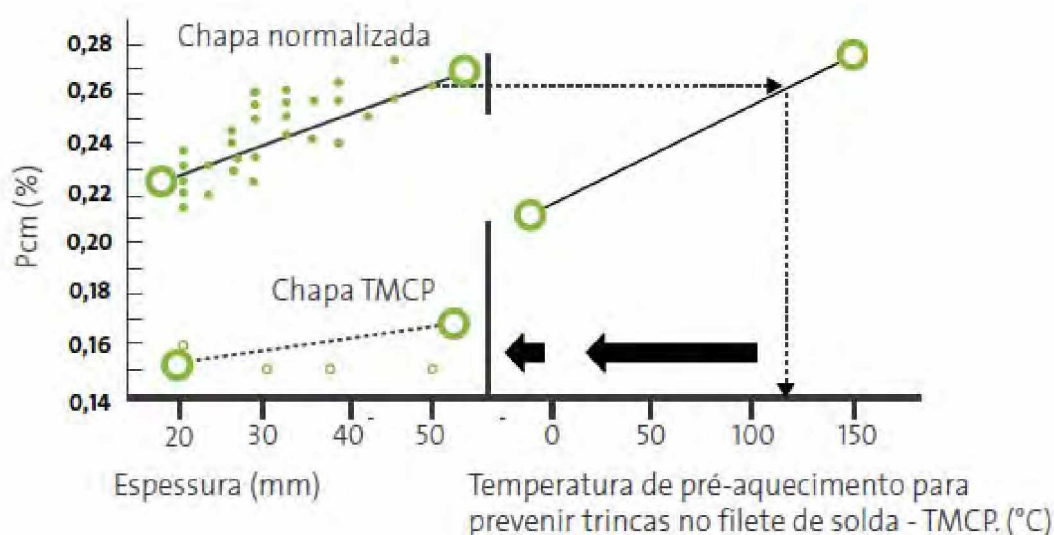
Gráfico 3 – Relação da energia absorvida na ZTA e no aporte térmico.  
Fonte: Nippon Steel

### Eliminação de pré-aquecimento

- Os aços da linha *Sincron* permitem a operação de soldagem, com redução da temperatura ou eliminação de pré-aquecimento com alta performance. Essa vantagem é bastante importante na fabricação de plataformas, navios, como, também, na construção civil. Conforme Gráfico 4.

### Desempenho do aço TMCP (soldabilidade)

Relação entre espessura, valor Pcm e parâmetro TMCP. Chapa TMCP e normalizada.



Nota: 1. Grau: EH36.

$$2. P_{CM}(\%) = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

Gráfico 4 – Relação entre Pcm e temperatura de pré-aquecimento na soldagem.

Fonte: Nippon Steel



### Dureza (Taper Hardness Test)

- Os produtos da linha *Sincron* proporcionam um material com um nível de dureza inferior ao aço convencional no teste de dureza com altas taxas de resfriamento. O Gráfico 5 ilustra um exemplo de teste com aços CLC da NSC para aplicação naval.

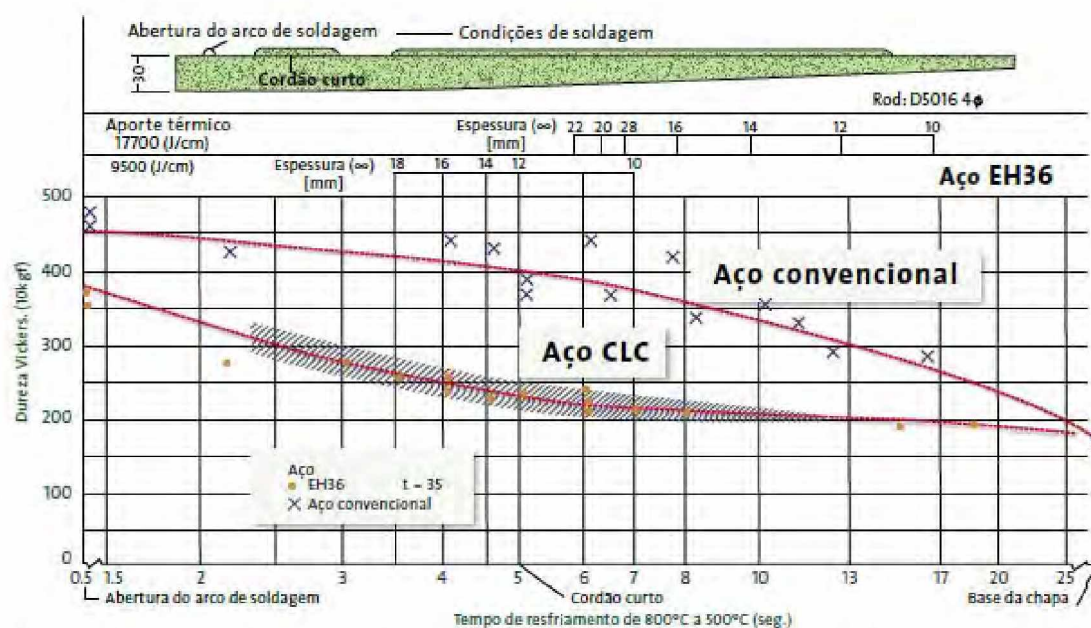


Gráfico 5 – Relação de dureza entre os aços convencionais e os da tecnologia CLC (Taper Test).

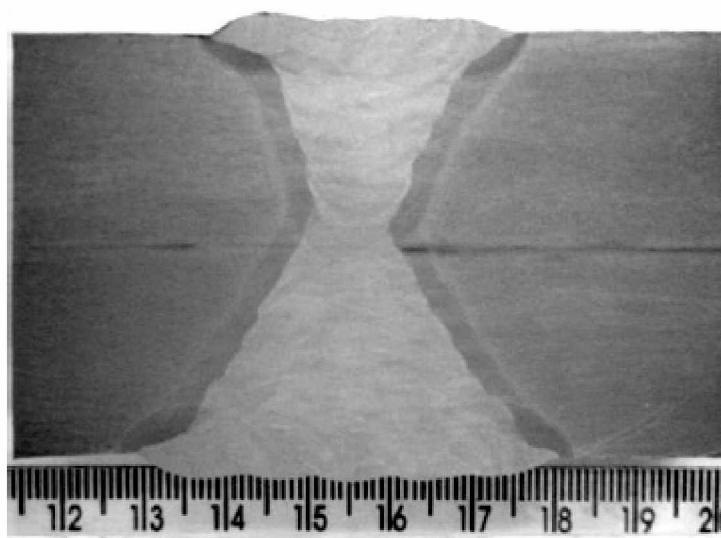
Fonte: Nippon Steel

## ANEXO III

### RESULTADOS DOS TESTES PRELIMINARES

#### 1 Resultado de ensaios com pré-aquecimento

##### 1.1 Macroestrutura

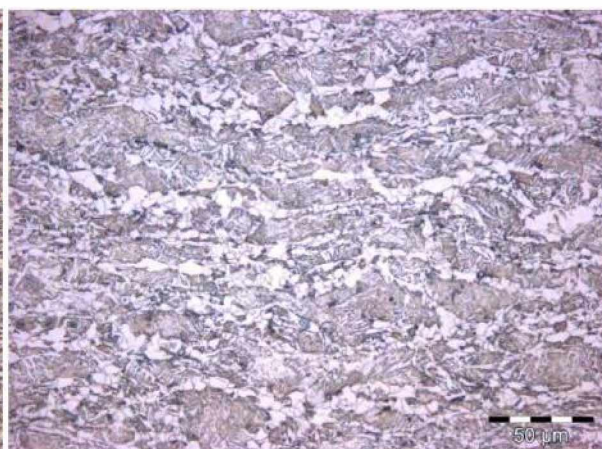
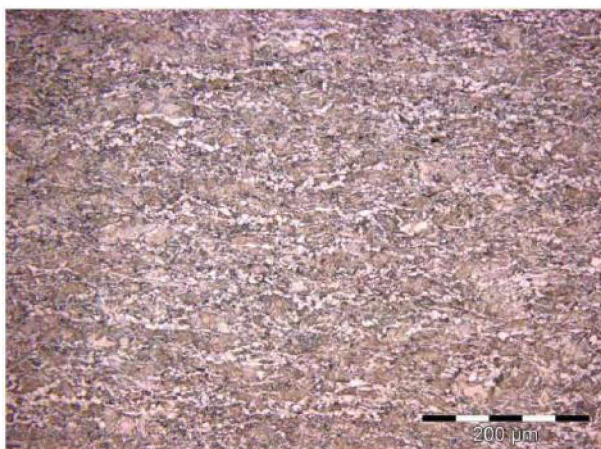


As chapas de aço ASTM A572 Grau 65 foram soldadas pelo processo FCAW com chanfro X (1/3 e 2/3), sendo realizado 27 passes do lado 2/3 e 12 passes do lado 1/3. Foi realizado pré-aquecimento de 150°C, controle de temperatura interpasse em 300°C e goivagem da raiz quando da passagem do lado 2/3 para 1/3. Demais parâmetros estão detalhados no capítulo 4.

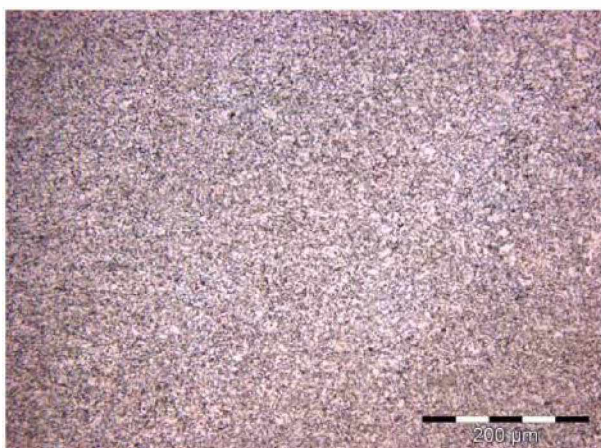
##### 1.2 Microestrutura:



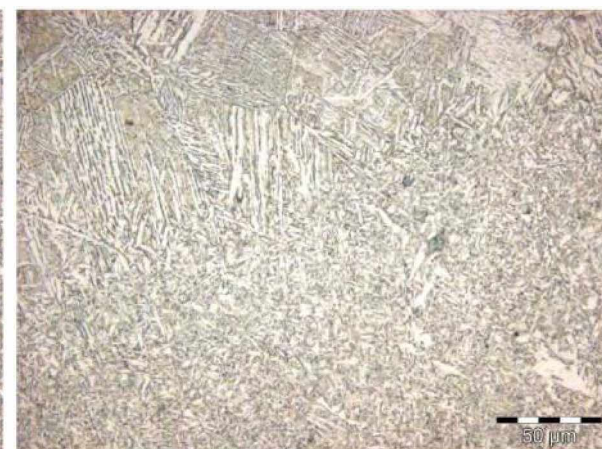
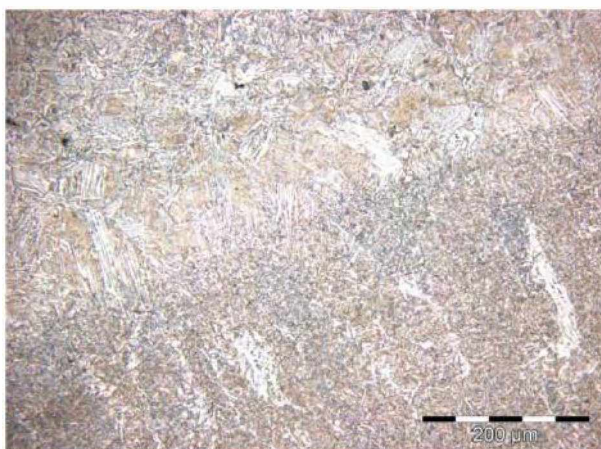
### 1.2.1 Metal de Base:



### 1.2.2 ZTA:

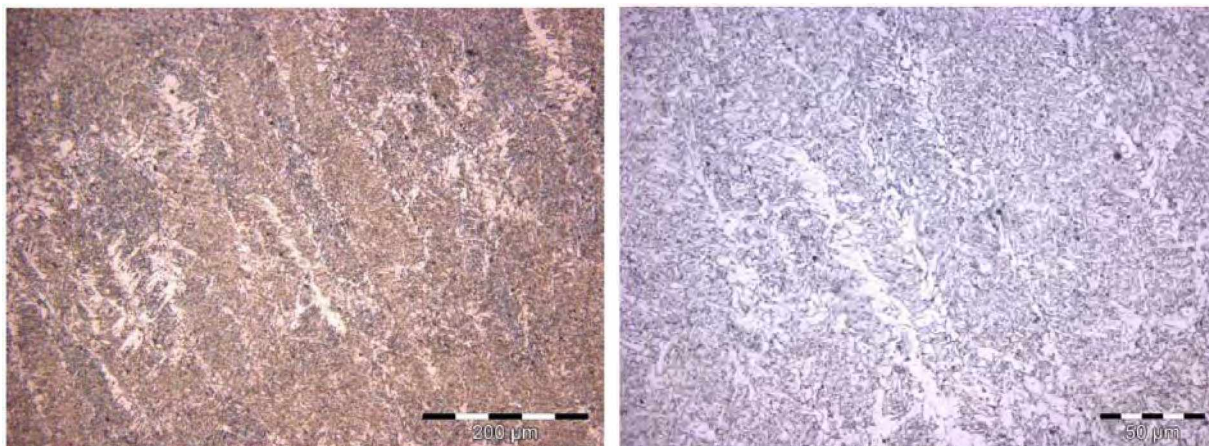


### 1.2.3 Linha de Fusão:





#### 1.2.4 Metal de adição:



#### 1.3 Ensaio de tração:

Tabela I.1.1 – Resultados do teste de tração em amostras de teste preliminar com pré-aquecimento

Tração										
Resultado	Posição da Fratura	Certificado USIMINAS			Especificação ASTM A572 Grau 65 (mín)			Especificação do consumível		
LR MPa		LE MPa	LR MPa	A MPa	LE MPa	LR MPa	A MPa	LE MPa	LR MPa	A MPa
607	Solda	509	618	24	450	520	17	501	561	30
609	Solda	516	641	21						
629	Solda	495	608	25						
620	Solda	503	615	24						

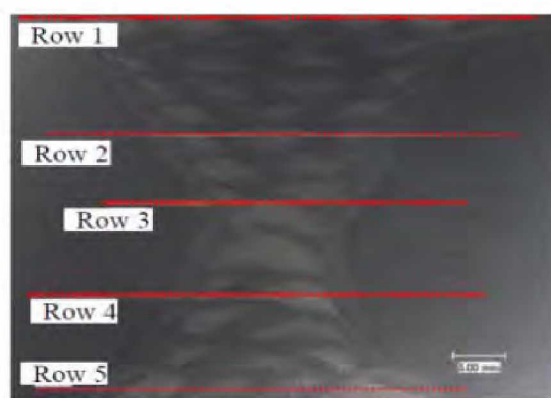
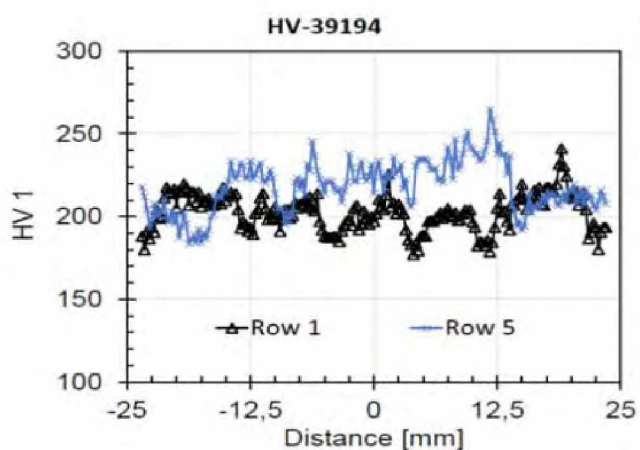
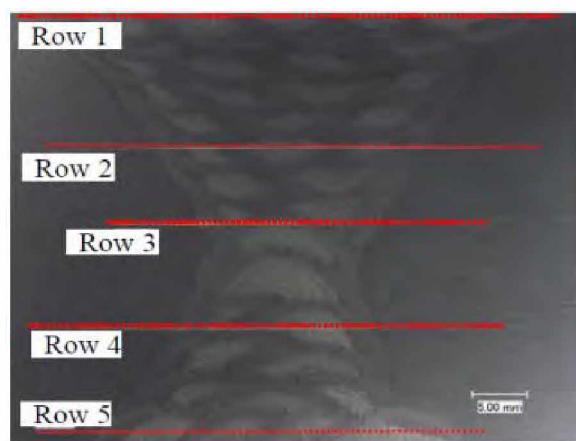
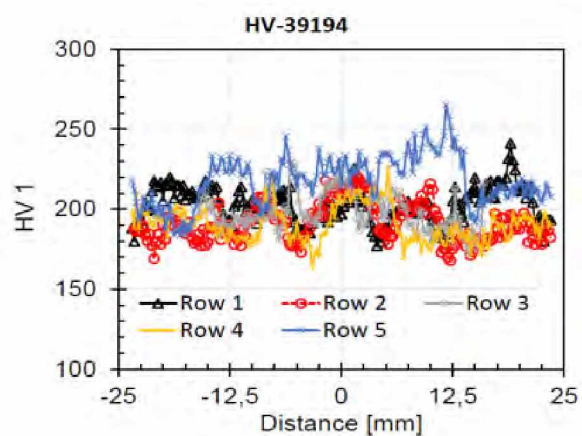
Houve a ocorrência de undermatching que significa que o metal de solda é menos resistente que o metal de base. Entretanto, para a soldagem estrutural, conforme descrito na tabela 2.3 da AWS D1.1 (2010), o procedimento de soldagem está validado desde que o resultado do limite de resistência à tração da amostra seja superior ao da especificação do aço. Neste teste o mesmo ocorre, significando apenas que o metal de base tem resistência muito superior ao mínimo requerido (LR > 520 MPa).

#### 1.4 ,Ensaio de dureza:

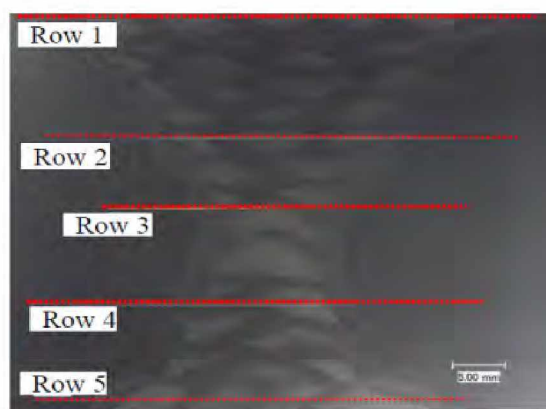
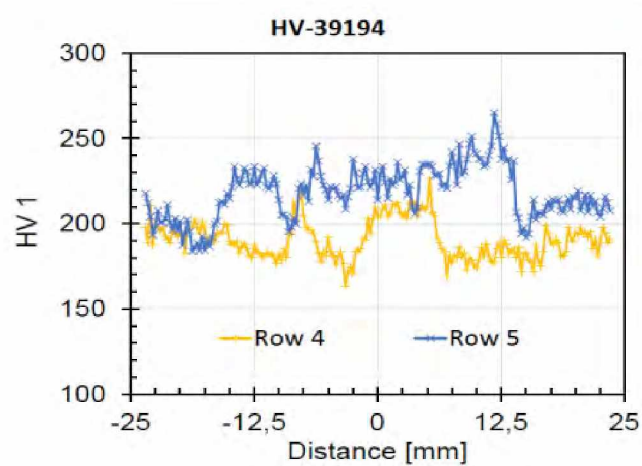
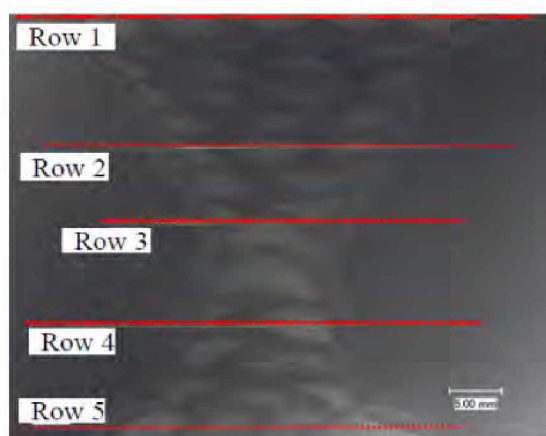
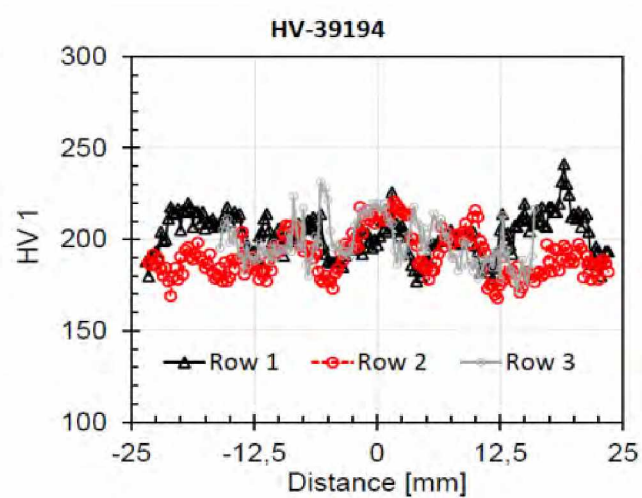
Tabela I.1.2 – Resultados de dureza em amostras de teste preliminar com pré-aquecimento

Dureza		
Solda	ZAC	Metal Base
HV10	HV10	HV10
241	213	200
		215
		209

#### 1.5 Mapeamento de dureza:



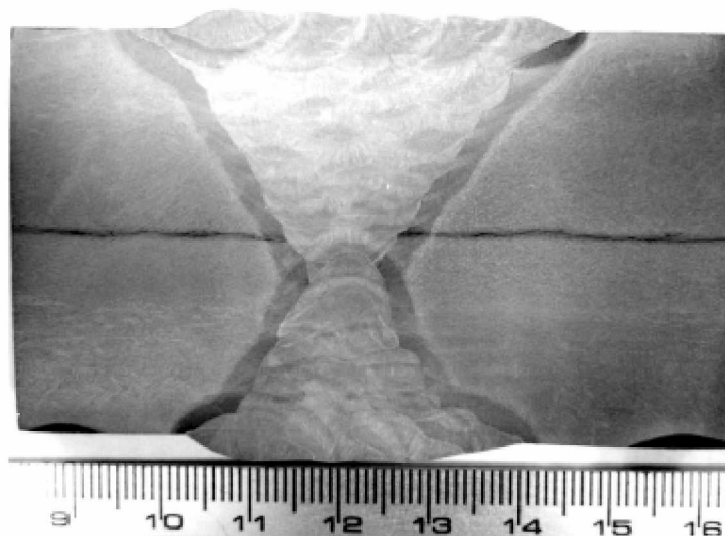




#### 1.6 Ensaio de dobramento:

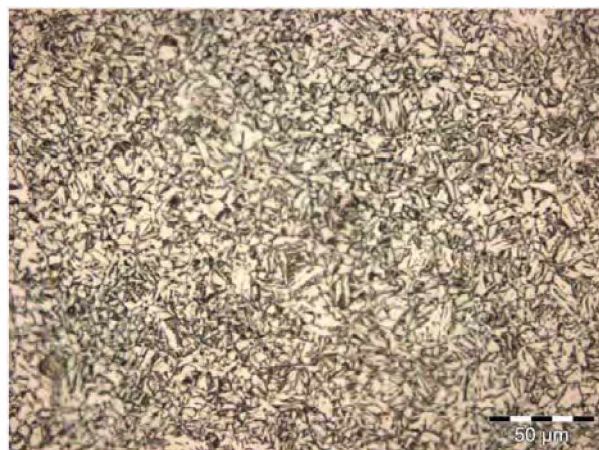
O teste de dobramento não apresentou nenhum tipo de trinca ou fratura que desclassificassem a solda.

## 2 Resultado de ensaios sem pré-aquecimento Macroestrutura:



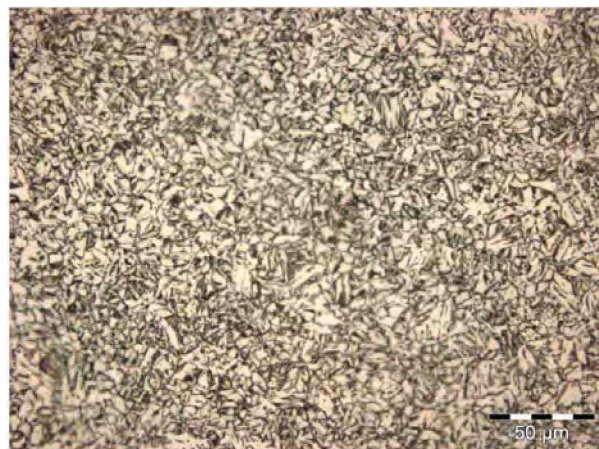
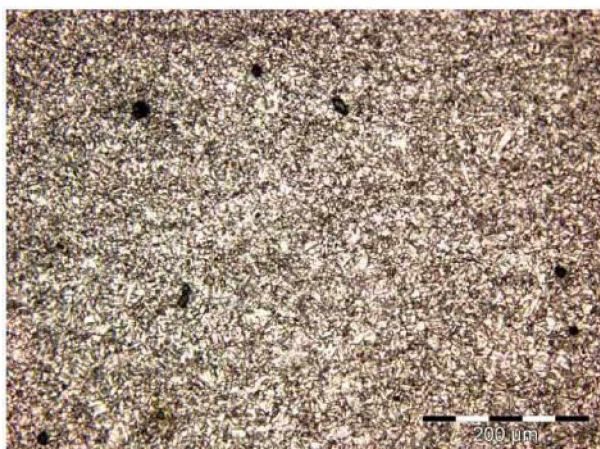
### 2.2 Microestrutura:

#### 2.2.1 Metal de Base:





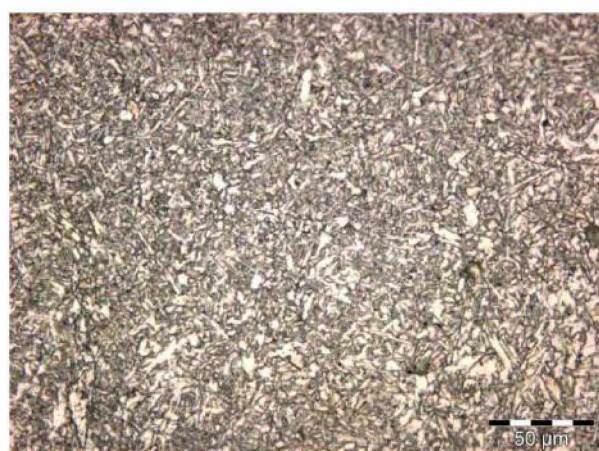
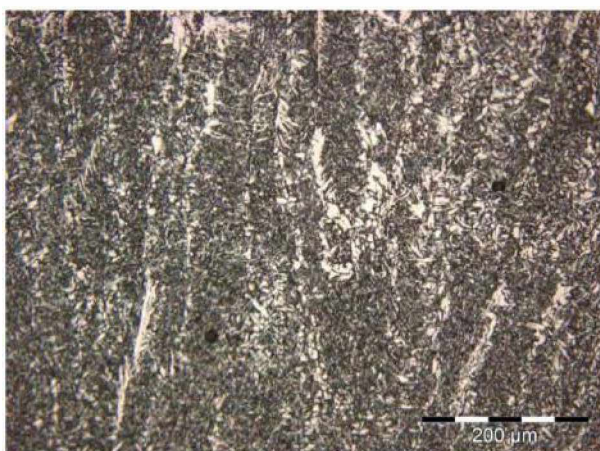
### 2.2.2 ZTA:



### 2.2.3 Linha de Fusão:



### 2.2.4 Metal de Adição:



### 2.3 Ensaios de tração:

Tabela I.2.1 – Resultados do teste de tração em amostras de teste preliminar sem pré-aquecimento

Tração										
Resultado	Posição da Fratura	Certificado USIMINAS			Especificação ASTM A572 Grau 65 (mín)			Especificação do consumível		
LR		LE	LR	A	LE	LR	A	LE	LR	A
MPa		MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
608	Solda	509	618	24	450	520	17	501	561	30
605	Solda	516	641	21						
642	Metal	495	608	25						
638	Metal	503	615	24						

Houve a ocorrência de undermatching também neste caso. Conforme descrito anteriormente, o mesmo é aceitável em soldas para perfil estrutural e o resultado também aprovado (LR>520 MPa).

#### 2.4 ,Ensaio de dureza:

Tabela I.2.2 – Resultados de dureza em amostras de teste preliminar sem pré-aquecimento


Dureza		
Solda	ZAC	Metal Base
HV10	HV10	HV10
236	228	197
		201
		209

#### 2.5 Ensaio de dobramento:

O teste de dobramento não apresentou nenhum tipo de trinca ou fratura que desclassificassem a solda.

### 3 Certificado das chapas utilizadas




<b>USIMINAS</b> USINAS SIDERÚRGICAS DE MINAS GERAIS S.A. USINA INTENDENTE CÂMARA - IPATINGA/MG/BRASIL SEDE: BELO HORIZONTE - MG - BRASIL R. PROF. JOSÉ VIEIRA DE MENDONÇA, 3011 BAIRRO ENGENHO NOGUEIRA - CP 806 - CEP: 31310-280 CNPJ: 60.834.730/0025-82 INSCRIÇÃO ESTADUAL: 313.002022.0120	<b>CERTIFICADO DE INSPEÇÃO</b> <b>INSPECTION CERTIFICATE</b> CHAPA GROSSA DO LCG STEEL PLATE	Cliente-Customer: CODEME ENGENHARIA S A Tolerâncias - Tolerances Espessura-Thickness -0,90/+1,70 mm Largura-Width -0,00/+30,00mm Comprimento-Length -0,00/+40,00mm	Nota Fiscal Commercial Invoice 1 002440876 1	Data de Emissão Date of Issue 13/01/2014																																																																		
A Usiminas certifica que os produtos discriminados foram fabricados pelo processo de oxigênio básico (LB), ensaiados e analisados de acordo com as especificações técnicas aplicáveis. A Usiminas disponibiliza, através do endereço eletrônico <a href="http://certificado.usiminas.com.br/S080/clientes/certificado/RequisicaoCertificado.jsp">http://certificado.usiminas.com.br/S080/clientes/certificado/RequisicaoCertificado.jsp</a> , uma ferramenta de verificação da autenticidade dos certificados de seus produtos. Para sua segurança, recomenda-se a utilização desse recurso. Usiminas certifies that the products herein described have been produced by using the basic oxygen process (LB), tested and analyzed according to the applicable technical specifications. Usiminas makes available, by using the following website <a href="http://certificado.usiminas.com.br/S080/clientes/certificado/RequisicaoCertificado.jsp">http://certificado.usiminas.com.br/S080/clientes/certificado/RequisicaoCertificado.jsp</a> , a tool to be used by the customer to verify (check) product certificate authenticity. Usiminas duly recommends the use of such tool for customer's safety.		Folha - Sheet = 1	Ordem de Venda Sale Order N° 00308841 Item 3	N° Certificado Certificate N° 3271813																																																																		
<b>Qualidade - Steel</b> EN-10025-4-04-S460-ML	<b>Dimensões Nominais - Nominal Dimensions</b> 44,50 X 3000,0 X 8000 mm	<b>Borda - Edge / Oleamento - Oiled</b> APARADA E NAO OLEADA CUT EDGE AND DRY	<b>Aparência Superfície - Surface Appearance</b> SUPERFICIE COMERCIAL COMMERCIAL SURFACE																																																																			
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Placa Volume</th> <th>Peças por Volume</th> <th>Peso Líquido</th> <th>Peso Bruto</th> <th>Corrida</th> <th>Amostra</th> </tr> <tr> <th>Slab</th> <th>Pieces per Packages</th> <th>Net Weight</th> <th>Gross Weight</th> <th>Heat</th> <th>Sample</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>282 814573823</td> <td>1</td> <td>6480</td> <td>6480</td> <td>480675</td> <td>40643430</td> </tr> <tr> <td>282 814573823</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>480675</td> <td>40643454</td> </tr> <tr> <td>282 814573823*</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>480675</td> <td>40718849</td> </tr> </tbody> </table>	Placa Volume	Peças por Volume	Peso Líquido	Peso Bruto	Corrida	Amostra	Slab	Pieces per Packages	Net Weight	Gross Weight	Heat	Sample	282 814573823	1	6480	6480	480675	40643430	282 814573823	0	0	0	480675	40643454	282 814573823*	0	0	0	480675	40718849		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Placa Volume</th> <th>Peças por Volume</th> <th>Peso Líquido</th> <th>Peso Bruto</th> <th>Corrida</th> <th>Amostra</th> </tr> <tr> <th>Slab</th> <th>Pieces per Packages</th> <th>Net Weight</th> <th>Gross Weight</th> <th>Heat</th> <th>Sample</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>282 814573823*</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>480675</td> <td>40718850</td> </tr> <tr> <td>282 814573823*</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>480675</td> <td>40718862</td> </tr> <tr> <td>282 814573823*</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>480675</td> <td>40718874</td> </tr> </tbody> </table>	Placa Volume	Peças por Volume	Peso Líquido	Peso Bruto	Corrida	Amostra	Slab	Pieces per Packages	Net Weight	Gross Weight	Heat	Sample	282 814573823*	0	0	0	480675	40718850	282 814573823*	0	0	0	480675	40718862	282 814573823*	0	0	0	480675	40718874								
Placa Volume	Peças por Volume	Peso Líquido	Peso Bruto	Corrida	Amostra																																																																	
Slab	Pieces per Packages	Net Weight	Gross Weight	Heat	Sample																																																																	
282 814573823	1	6480	6480	480675	40643430																																																																	
282 814573823	0	0	0	480675	40643454																																																																	
282 814573823*	0	0	0	480675	40718849																																																																	
Placa Volume	Peças por Volume	Peso Líquido	Peso Bruto	Corrida	Amostra																																																																	
Slab	Pieces per Packages	Net Weight	Gross Weight	Heat	Sample																																																																	
282 814573823*	0	0	0	480675	40718850																																																																	
282 814573823*	0	0	0	480675	40718862																																																																	
282 814573823*	0	0	0	480675	40718874																																																																	
Peso Líquido Real Total-Total Actual Net Weight = 6,480 Tonelagem Métrica-Metric Ton Peso Bruto Real Total-Total Actual Gross Weight = 6,480 Tonelagem Métrica-Metric Ton		Peças-Pieces = 1 Volumes = 1																																																																				
<b>Ensaio de Tração - Tensile Test</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Amostra</th> <th>Pos</th> <th>Dir</th> <th>LE</th> <th>LR</th> <th>LE/LR(%)</th> <th>AL(%)</th> </tr> <tr> <th>Sample</th> <th></th> <th></th> <th>YS</th> <th>TS</th> <th>YS/TS</th> <th>E1</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>40718850</td> <td>B4</td> <td>L</td> <td>509</td> <td>618</td> <td>82</td> <td>23,5</td> </tr> <tr> <td>40718850</td> <td>B4</td> <td>C</td> <td>316</td> <td>641</td> <td>80</td> <td>21,0</td> </tr> <tr> <td>40718874</td> <td>T4</td> <td>L</td> <td>495</td> <td>608</td> <td>81</td> <td>25,0</td> </tr> <tr> <td>40718874</td> <td>T4</td> <td>C</td> <td>303</td> <td>618</td> <td>82</td> <td>24,0</td> </tr> </tbody> </table>		Amostra	Pos	Dir	LE	LR	LE/LR(%)	AL(%)	Sample			YS	TS	YS/TS	E1	40718850	B4	L	509	618	82	23,5	40718850	B4	C	316	641	80	21,0	40718874	T4	L	495	608	81	25,0	40718874	T4	C	303	618	82	24,0	<b>Tração na Espessura - Thickness Tension</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Amostra</th> <th>Pos</th> <th>RA1</th> <th>RA2</th> <th>RA3</th> <th>RAM</th> </tr> <tr> <th>Sample</th> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>40718849</td> <td>B2</td> <td>71</td> <td>61</td> <td>65</td> <td>66</td> </tr> <tr> <td>40718862</td> <td>T2</td> <td>69</td> <td>66</td> <td>69</td> <td>68</td> </tr> </tbody> </table>		Amostra	Pos	RA1	RA2	RA3	RAM	Sample						40718849	B2	71	61	65	66	40718862	T2	69	66	69	68	Valores apenas indicativos-Indicative values only
Amostra	Pos	Dir	LE	LR	LE/LR(%)	AL(%)																																																																
Sample			YS	TS	YS/TS	E1																																																																
40718850	B4	L	509	618	82	23,5																																																																
40718850	B4	C	316	641	80	21,0																																																																
40718874	T4	L	495	608	81	25,0																																																																
40718874	T4	C	303	618	82	24,0																																																																
Amostra	Pos	RA1	RA2	RA3	RAM																																																																	
Sample																																																																						
40718849	B2	71	61	65	66																																																																	
40718862	T2	69	66	69	68																																																																	
Unidade-Unit = MPa EM = 5,65A <sup>1/2</sup> mm Larg = 20 mm S = Retangular Valores apenas indicativos-Indicative values only		<b>Ensaio de Charpy - Charpy Test</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Amostra</th> <th>Pos</th> <th>Dir</th> <th>Temp</th> <th>EA1</th> <th>EA2</th> <th>EA3</th> <th>ERM</th> </tr> <tr> <th>Sample</th> <th></th> <th></th> <th></th> <th>AE1</th> <th>AE2</th> <th>AE3</th> <th>REM</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>40718850</td> <td>B4</td> <td>L</td> <td>-50</td> <td>271</td> <td>219</td> <td>241</td> <td>210</td> </tr> <tr> <td>40718850</td> <td>B4</td> <td>C</td> <td>-50</td> <td>212</td> <td>225</td> <td>208</td> <td>218</td> </tr> <tr> <td>40718874</td> <td>T4</td> <td>L</td> <td>-50</td> <td>328</td> <td>306</td> <td>318</td> <td>317</td> </tr> <tr> <td>40718874</td> <td>T4</td> <td>C</td> <td>-50</td> <td>226</td> <td>235</td> <td>265</td> <td>242</td> </tr> </tbody> </table>		Amostra	Pos	Dir	Temp	EA1	EA2	EA3	ERM	Sample				AE1	AE2	AE3	REM	40718850	B4	L	-50	271	219	241	210	40718850	B4	C	-50	212	225	208	218	40718874	T4	L	-50	328	306	318	317	40718874	T4	C	-50	226	235	265	242	Unidade-Unit = Joule Unidade de Temperatura-Temperature Unit = °C Entalhe em V com 1mm de Profundidade-V notch with 1mm Dimensão-Size = 10x10mm Valores apenas indicativos-Indicative values only																		
Amostra	Pos	Dir	Temp	EA1	EA2	EA3	ERM																																																															
Sample				AE1	AE2	AE3	REM																																																															
40718850	B4	L	-50	271	219	241	210																																																															
40718850	B4	C	-50	212	225	208	218																																																															
40718874	T4	L	-50	328	306	318	317																																																															
40718874	T4	C	-50	226	235	265	242																																																															
<b>Ensaio de Dureza - Hardness Test</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Amostra</th> <th>Pos</th> <th>Dureza</th> </tr> <tr> <th>Sample</th> <th></th> <th>Hardness</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>40718850</td> <td>B4</td> <td>199</td> </tr> <tr> <td>40718874</td> <td>T4</td> <td>200</td> </tr> </tbody> </table>		Amostra	Pos	Dureza	Sample		Hardness	40718850	B4	199	40718874	T4	200	<b>Ensaio de Metalografia - Metallographic Test</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Amostra</th> <th>Pos</th> <th>Tamanho Grão Ferrítico</th> </tr> <tr> <th>Sample</th> <th></th> <th>Ferritic Grain Size</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>40718850</td> <td>B4</td> <td>13,0</td> </tr> <tr> <td>40718874</td> <td>T4</td> <td>12,0</td> </tr> </tbody> </table>		Amostra	Pos	Tamanho Grão Ferrítico	Sample		Ferritic Grain Size	40718850	B4	13,0	40718874	T4	12,0	Tamanho de Grão-Grain Size = ASTM E-112 Valores apenas indicativos-Indicative values only																																										
Amostra	Pos	Dureza																																																																				
Sample		Hardness																																																																				
40718850	B4	199																																																																				
40718874	T4	200																																																																				
Amostra	Pos	Tamanho Grão Ferrítico																																																																				
Sample		Ferritic Grain Size																																																																				
40718850	B4	13,0																																																																				
40718874	T4	12,0																																																																				
<b>Ensaio de Dobramento - Bend Test</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Amostra</th> <th>Pos</th> <th>Dir</th> <th>Obtido</th> </tr> <tr> <th>Sample</th> <th></th> <th></th> <th>Obtained</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>40643430</td> <td>B4</td> <td>C</td> <td>BOM</td> </tr> <tr> <td>40643454</td> <td>T4</td> <td>C</td> <td>BOM</td> </tr> </tbody> </table>		Amostra	Pos	Dir	Obtido	Sample			Obtained	40643430	B4	C	BOM	40643454	T4	C	BOM	Tipo de Dureza-Hardness Type = Brinell (3T) Valores apenas indicativos-Indicative values only		Sincron: Marca registrada da Usiminas para as chapas grossas TMCP produzidas pelo processo CLC (Laminação Controlada + Resfriamento Acelerado) Sincron: Brand name of Usiminas TMCP Plates produced by CLC process (Controlled Rolling + Accelerated Cooling) Certificamos que este material foi inspecionado e possui nível de radiação abaixo de 0,5µSv/h. We certify that this material has been inspected and the radiation level is less than 0,5µSv/h.																																																		
Amostra	Pos	Dir	Obtido																																																																			
Sample			Obtained																																																																			
40643430	B4	C	BOM																																																																			
40643454	T4	C	BOM																																																																			
<b>Observações - Remarks</b> QUALIDADE:BHS450M - VOL:0814573282 FDS - Ficha de Dados de Segurança do Produto número 04, disponível na Extranet da Usiminas MSDS - Material Safety Data Sheet N° 04 available at Usiminas Extranet		<div style="text-align: center;">   <b>Helber Luiz Oliveira Ribeiro</b>          SUPERINTENDÊNCIA DE GARANTIA DA QUALIDADE          QUALITY ASSURANCE MANAGEMENT       </div> <div style="text-align: right;">         VISTORIADOR          SURVEYOR       </div>																																																																				




<b>USIMINAS</b> USINAS SIDERÚRGICAS DE MINAS GERAIS S.A. USINA INTENDENTE CÂMARA - IPATINGA/MG/BRASIL SEDE: BELO HORIZONTE - MG - BRASIL R. PROF. JOSÉ VIEIRA DE MENDONÇA, 3011 BAIRRO ENGENHO NOGUEIRA - CP 806 - CEP: 31310-260 CNPJ: 60.894.730/0025-62 INSCRIÇÃO ESTADUAL: 313.002022.0120	<b>CERTIFICADO DE INSPEÇÃO</b> <b>INSPECTION CERTIFICATE</b> <b>CHAPA GROSSA DO LCG</b> <b>STEEL PLATE</b>		Cliente-Customer: CODEME ENGENHARIA S A Tolerâncias - Tolerances Espessura-Thickness -0,90/+1,70 mm Largura-Width -0,00/+30,00mm Comprimento-Length -0,00/+40,00mm		Nota Fiscal Commercial Invoice <b>1 002440876 1</b>	Data de Emissão Date of Issue <b>13/01/2014</b>
	A Usiminas certifica que os produtos discriminados foram fabricados pelo processo de oxigênio básico (LO), ensaiados e analisados de acordo com as especificações técnicas aplicáveis. A Usiminas disponibiliza, através do endereço eletrônico "http://certificado.usiminas.com.br/3099/cliente/certificado/RequisicaoCertificado.jsp", uma ferramenta de verificação da autenticidade dos certificados de seus produtos. Para sua segurança, recomendamos a utilização desse recurso. Usiminas certifies that the products herein described have been produced by the basic oxygen process (LO), tested and analyzed according to the applicable technical specifications. Usiminas makes available, by using the following website "http://certificado.usiminas.com.br/3099/cliente/certificado/RequisicaoCertificado.jsp", a tool to be used by the customer to verify (check) product certificate authenticity. Usiminas duly recommends the use of such tool for customers safety.		Folha - Sheet = 2		N° <b>00308841</b>	Item <b>3</b>
	Qualidade - Steel <b>EN-10025-4-04-S460-ML</b>		Dimensões Nominais - Nominal Dimensions <b>44,50 X 3000,0 X 6000 mm</b>	Borda - Edge / Oleamento - Oiled <b>APARADA E NAO OLEADA</b> <b>CUT EDGE AND DRY</b>	Aparência Superfície - Surface Appearance <b>SUPERFICIE COMERCIAL</b> <b>COMMERCIAL SURFACE</b>	


  

<b>Ensaio de Metalografia (Inclusão) - Metallographic Test (Inclusion)</b> Amostra Pos Sulfetos Oxidos Sample Sulphides Oxides 40718880 B4 1F/OG 1 1F/OG 1 40718874 T4 1F/OG 1 2F/OG 1 Análise de Inclusão-Inclusions Analysis = ASTM 45 Parte I e II Valores apenas indicativos-Indicative values only Composição Química (% Peso) - Chemical Composition (% Weight) <table border="1"> <thead> <tr> <th>Corrida</th> <th>Análise</th> <th>C</th> <th>Si</th> <th>Mn</th> <th>P</th> <th>S</th> <th>Al</th> <th>Cu</th> <th>Nb</th> <th>V</th> <th>Ti</th> <th>Cr</th> <th>Ni</th> <th>Mo</th> <th>Sn</th> <th>N</th> <th>B</th> <th>Ca</th> <th>Sb</th> <th>Pb</th> <th>Ceq</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>480678</td> <td>F</td> <td>0,10</td> <td>0,25</td> <td>1,49</td> <td>0,014</td> <td>0,0019</td> <td>0,018</td> <td>0,149</td> <td>0,028</td> <td>0,004</td> <td>0,012</td> <td>0,027</td> <td>0,164</td> <td>0,006</td> <td>0,001</td> <td>0,0037</td> <td>0,0002</td> <td>0,0004</td> <td>0,00</td> <td>0,001</td> <td>B-0,38</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Ch-40718880</td> <td>0,10</td> <td>0,24</td> <td>1,49</td> <td>0,013</td> <td>0,0022</td> <td>0,021</td> <td>0,161</td> <td>0,029</td> <td>0,004</td> <td>0,012</td> <td>0,020</td> <td>0,161</td> <td>0,009</td> <td></td> <td>0,0041</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>B-0,38</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Ch-40718874</td> <td>0,10</td> <td>0,24</td> <td>1,49</td> <td>0,013</td> <td>0,0020</td> <td>0,021</td> <td>0,153</td> <td>0,029</td> <td>0,004</td> <td>0,012</td> <td>0,020</td> <td>0,160</td> <td>0,009</td> <td></td> <td>0,0041</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>B-0,38</td> </tr> </tbody> </table> Fórmula do Carbono Equivalente - Carbon Equivalent Formula $E = C-Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15$ Ch: Valores apenas indicativos-Indicative values only <b>Ensaio por Ultrassom - Ultrasonic Test</b> A(s) chapa(s) foi(foram) aprovada(s) em ensaio por ultrassom com resultados satisfatórios de acordo com a especificação EN-10160:1999 TAB. 3 CL.S2 E TAB5 CL E3 The plate(s) was(were) approved by ultrasonic test with satisfactory results in accordance with specification EN-10160:1999 TAB. 3 CL.S2 E TAB5 CL E3 <b>Abreviaturas - Abbreviations</b> * = Volume Amostrado-Mother Plate LE = Limite de Escoamento - YS = Yield Strength AL = Alongamento - EL = Elongation T2 = Topo no meio da largura-Top at mid width C = Transversal-Transverse L = Longitudinal Pos = Posição-Position BM = Base Medida-Gauge Length S = Seção Transversal-Cross Transverse P = Panela-Ladle EA = Energia Absorvida - AE = Absorbed Energy		Corrida	Análise	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Nb	V	Ti	Cr	Ni	Mo	Sn	N	B	Ca	Sb	Pb	Ceq	480678	F	0,10	0,25	1,49	0,014	0,0019	0,018	0,149	0,028	0,004	0,012	0,027	0,164	0,006	0,001	0,0037	0,0002	0,0004	0,00	0,001	B-0,38		Ch-40718880	0,10	0,24	1,49	0,013	0,0022	0,021	0,161	0,029	0,004	0,012	0,020	0,161	0,009		0,0041					B-0,38		Ch-40718874	0,10	0,24	1,49	0,013	0,0020	0,021	0,153	0,029	0,004	0,012	0,020	0,160	0,009		0,0041					B-0,38	<b>Condição de Fornecimento - Supply Condition</b> <b>LAMINAÇÃO CONTROLADA - THERMO-MECHANICAL ROLLING</b> <b>Abreviaturas - Abbreviations</b> Esp = Espessura-Thickness LR = Limite de Resistência - TS = Tensile Strength RA = Redução de Área-Reduction of Area - (%) B2 = Base no meio da largura-Bottom at mid width Dir = Direção-Direction T4 = Topo a um quarto da largura-Top at a quarter width B4 = Base a um quarto da largura-Bottom at a quarter width Larg = Largura-Width Diam = Diâmetro-Diameter Temp = Temperatura-Temperature Ch = Check Análise-Check Analysis Al = Alumínio Solúvel em Ácido-Aluminum Soluble in Acid	
Corrida	Análise	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Nb	V	Ti	Cr	Ni	Mo	Sn	N	B	Ca	Sb	Pb	Ceq																																																																						
480678	F	0,10	0,25	1,49	0,014	0,0019	0,018	0,149	0,028	0,004	0,012	0,027	0,164	0,006	0,001	0,0037	0,0002	0,0004	0,00	0,001	B-0,38																																																																						
	Ch-40718880	0,10	0,24	1,49	0,013	0,0022	0,021	0,161	0,029	0,004	0,012	0,020	0,161	0,009		0,0041					B-0,38																																																																						
	Ch-40718874	0,10	0,24	1,49	0,013	0,0020	0,021	0,153	0,029	0,004	0,012	0,020	0,160	0,009		0,0041					B-0,38																																																																						

  
 Sistema de Gestão  
 Certificado pelas normas  
 Management System Approved  
 By the Following Standard:  
 ISO 9001  
 ISO 14001  
 ISO/TS 16949  
 OHSAS 18001  
 PRODUTO CONFORME  
 ROHS & ELV  
 COMPLIANT PRODUCT



Sincron: Marca registrada da Usiminas para as chapas grossas TMCP produzidas pelo processo CLC (Laminação Controlada + Resfriamento Acelerado)  
 Sincron: Brand name of Usiminas TMCP Plates produced by CLC process (Controlled Rolling + Accelerated Cooling)  
 Certificamos que este material foi inspecionado e possui nível de radiação abaixo de 0,5µSv/h. We certify that this material has been inspected and the radiation level is less than 0,5µSv/h.

<b>Observações - Remarks</b> QUALIDADE:BHS450M - VOL-0814573282 FDS - Ficha de Dados de Segurança do Produto número 04, disponível na Extranet da Usiminas MSDS - Material Safety Data Sheet N° 04 available at Usiminas Extranet	 <b>Helber Luiz Oliveira Ribeiro</b> SUPERINTENDÊNCIA DE GARANTIA DA QUALIDADE QUALITY ASSURANCE MANAGEMENT
	VISTORIADOR SURVEYOR



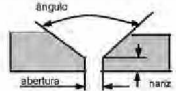
## **ANEXO IV**



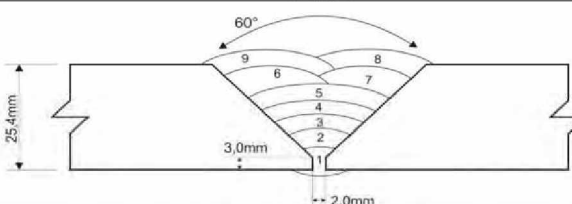
### **ESPECIFICAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM**

A CODEME, empresa do ramo de fabricação de estruturas metálicas solicitou ao inspetor Antônio Claret da Costa que realizasse a especificação dos procedimentos de soldagem (EPS), sendo a mesma validada através de testes realizados na empresa com ensaios realizados na Universidade de Itaúna.



Para a EPS foram considerados pelo inspetor a norma AWS D1.1 tal qual e por isso os procedimentos de pré-aquecimento continuam sendo citados nas mesmas.

Foram realizados procedimentos para soldagem em aço ASTM A572 grau 65 em processos FCAW e SAW, além de procedimento para soldagem dissimilar FCAW entre aço ASTM A572 grau 50 e grau 65.

 <b>ACC</b> INSPEÇÕES TÉCNICA	 <b>CODEME</b> CONSTRUTORA EM AÇO																																												
<b>ESPECIFICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM</b> WELDING PROCEDURE SPECIFICATION																																													
Empresa / Fabricante: Codeme Company Name:																																													
EPS qualificada por: RQPS Nº 001/14 WPS supporting by:	EPS Nº: 001/14 WPS Nº:																																												
Código / Norma: AWS D1.1 ed 2010 Code:	DATA: 12/05/2014 Date:																																												
Processo de soldagem: SAW - Submerged Arc Welding Welding process: Submerged Arc Welding																																													
<b>Metal de base</b> Base Metal:																																													
Metal de base: Usiminas Sincron-BHS-450M (AWS D1.1 2010 Tabela 3.1 Grupo III) x Usiminas Sincron-BHS-450M (AWS D1.1 2010 Tabela 3.1 Grupo III) Base Metal:																																													
Espessura: de 3,2mm a ilimitado (*5) Thickness: 1/8" at Unlimited	Ø nominal: ≥ 610,0mm para soldas em chanfro, limitada para soldas em ângulo Ø nominal:																																												
Progressão de soldagem: NA Welding progress:																																													
Posição de soldagem: 1G/ 1F Plana Groove position:																																													
<b>Metais de adição</b> Filler metals:																																													
Eletrodo / arame: Arame - AWS A5.23 EA2 (Ø ≤ 3,97) Fluxo - AWS A5.23 FBA4 Specification and classification electrode / rod:																																													
Vasão do Gás: NA Flow rate gas:	A number: NA A number:																																												
Espessura metal soldado: de 3,2mm a ilimitado Fillet metal thickness: 1/8" at Unlimited	F number: NA F number:																																												
Gás de proteção: NA Shielded gas:																																													
<b>Controle de temperaturas</b> Welding temperature control:																																													
Tratamento térmico: NA Post weld heat treatment:	Pré-aquecimento mínimo: (*1) 80°C Minimum pre-heat:																																												
Pós-aquecimento: NA Post heat:																																													
Máxima temperatura interpasso: (*1) 270°C Interpass maximum temperature:																																													
<b>Técnicas de soldagem</b> Welding technique:																																													
Limpeza inicial: Escovamento ou esmerilhamento Initial cleaning: Brushing or grinding	Velocidade de Alimentação do Arame: de 1 a 1,1 m/min Wire feed speed:																																												
Corrente: Contínua polaridade inversa - CC+ Current: Direct current electrode positive - DCEP	Velocidade de Soldagem: de 8 a 19cm/min Speed travel:																																												
Modo de transferência: NA Transfer mode: Globular	Oscilação máxima: Passes retilíneos Maximum wave beat: Stringer bead																																												
Junta: Topo penetração total com cobre-junta ou extração de raiz / Junta em ângulo Joint design: Full weld joint - complete penetration with backing or backgouged / Fillet weld	Ângulo de Trabalho: 90° ± 5° Work Angle:																																												
Limpeza entre passes: Escovamento ou esmerilhamento Interpass cleaning: Brushing or grinding	Ângulo do Eletrodo: 90° ± 3° Electrode Angle:																																												
<b>Croqui da junta e da solda</b> Joint details:																																													
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>Tipo de chanfro</th> <th>Ângulo do chanfro</th> <th>Nariz (mm)</th> <th>Raiz (mm)</th> <th>Tipo de cobre-junta</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>V</td> <td>60° +10° -5°</td> <td>1 a 3</td> <td>2 a 8</td> <td>backing</td> </tr> <tr> <td>1/2 V</td> <td>45° +10° -5°</td> <td>1 a 3</td> <td>2 a 8</td> <td>backing</td> </tr> <tr> <td>V</td> <td>60° +10° -5°</td> <td>1 - 2</td> <td>0 - 4</td> <td>backgouged</td> </tr> <tr> <td>1/2 V</td> <td>45° +10° -5°</td> <td>1 - 2</td> <td>0 - 4</td> <td>backgouged</td> </tr> </tbody> </table>	Tipo de chanfro	Ângulo do chanfro	Nariz (mm)	Raiz (mm)	Tipo de cobre-junta	V	60° +10° -5°	1 a 3	2 a 8	backing	1/2 V	45° +10° -5°	1 a 3	2 a 8	backing	V	60° +10° -5°	1 - 2	0 - 4	backgouged	1/2 V	45° +10° -5°	1 - 2	0 - 4	backgouged																			
Tipo de chanfro	Ângulo do chanfro	Nariz (mm)	Raiz (mm)	Tipo de cobre-junta																																									
V	60° +10° -5°	1 a 3	2 a 8	backing																																									
1/2 V	45° +10° -5°	1 a 3	2 a 8	backing																																									
V	60° +10° -5°	1 - 2	0 - 4	backgouged																																									
1/2 V	45° +10° -5°	1 - 2	0 - 4	backgouged																																									
Qualificado todas as configurações de chanfros, apresentadas nas figuras 3.3 e 3.4 da norma AWS D1.1 2010																																													
<b>Parâmetros da soldagem</b> Welding procedure:																																													
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>Processo</th> <th>Eletrodo</th> <th>Ø (mm)</th> <th>Passo</th> <th>Polaridade</th> <th>Temperatura</th> <th>Corrente</th> <th>Tensão</th> <th>Velocidade</th> <th>Veloc. aliment.</th> <th>Aporte térmico</th> </tr> <tr> <th>Process</th> <th>Electrode</th> <th>(mm)</th> <th>Pass</th> <th>Current</th> <th>(°C) (*1)</th> <th>(A)</th> <th>(V)</th> <th>(cm/min)</th> <th>Arame (m/min)</th> <th>(Heat Input) max (J/cm) (*2)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SAW</td> <td>FBA4/EA2</td> <td>≤ 2,5</td> <td>Primeiro</td> <td>CC+</td> <td>23 - 350</td> <td>283 a 358</td> <td>25 a 29</td> <td>11 a 19</td> <td>1</td> <td>76.500</td> </tr> <tr> <td>SAW</td> <td>FBA4/EA2</td> <td>≤ 2,5</td> <td>Demais</td> <td>CC+</td> <td>23 - 350</td> <td>383 a 468</td> <td>26 a 32</td> <td>8 a 19</td> <td>1,1</td> <td>76.500</td> </tr> </tbody> </table>	Processo	Eletrodo	Ø (mm)	Passo	Polaridade	Temperatura	Corrente	Tensão	Velocidade	Veloc. aliment.	Aporte térmico	Process	Electrode	(mm)	Pass	Current	(°C) (*1)	(A)	(V)	(cm/min)	Arame (m/min)	(Heat Input) max (J/cm) (*2)	SAW	FBA4/EA2	≤ 2,5	Primeiro	CC+	23 - 350	283 a 358	25 a 29	11 a 19	1	76.500	SAW	FBA4/EA2	≤ 2,5	Demais	CC+	23 - 350	383 a 468	26 a 32	8 a 19	1,1	76.500	
Processo	Eletrodo	Ø (mm)	Passo	Polaridade	Temperatura	Corrente	Tensão	Velocidade	Veloc. aliment.	Aporte térmico																																			
Process	Electrode	(mm)	Pass	Current	(°C) (*1)	(A)	(V)	(cm/min)	Arame (m/min)	(Heat Input) max (J/cm) (*2)																																			
SAW	FBA4/EA2	≤ 2,5	Primeiro	CC+	23 - 350	283 a 358	25 a 29	11 a 19	1	76.500																																			
SAW	FBA4/EA2	≤ 2,5	Demais	CC+	23 - 350	383 a 468	26 a 32	8 a 19	1,1	76.500																																			
<b>Observações</b> Remarks:																																													
(*1) Ver acima valores de pré-aquecimento e temperatura de interpasso (*2) Heat input máximo aplicável somente quando exigido em documentos contratuais.																																													
Controle de tenacidade e/ou sujeito a tratamento térmico de alívio de tensões mata-juntas : 10,0 mm																																													
Projeção: Assinado:  Data: Data:																																													

 <b>ACC</b> INSPEÇÕES TÉCNICA	 <b>CODEME</b> CONSTRUÇÕES EM AÇO									
<b>REGISTRO DE QUALIFICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM</b> PROCEDURE QUALIFICATION RECORD										
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <b>Empresa / Fabricante:</b> Codeme Company Name:  <b>RQPS qualificada por:</b> ACC Inspeções Técnicas PQR qualified by:  <b>Código / Norma:</b> AWS D1.1 ed 2010 Code:  <b>Processo de soldagem:</b> SAW - Submerged Arc Welding Welding process: Submerged Arc Welding         </div> <div> <b>RQPS Nº:</b> 001/14 WPS Nº:   <b>DATA:</b> 12/05/2014 Date:         </div> <div> <b>FOLHA:</b> 1 / 2 Sheet:         </div> </div>										
<b>Metal de base</b> Base Metals										
<b>Metal de base:</b> Usiminas Sincron-BHS-450M (ASTM A-572 Gr.65 - AWS D1.1 2010 Tabela 3.1 Grupo III) Base Metal: <b>Espessura:</b> 25,4 mm Thickness: <b>Progressão de soldagem:</b> NA Welding progress: <b>Posição de soldagem:</b> 1G Plana Groove position:										
<b>Metais de adição</b> Filler metals										
<b>Eletrodo / arame:</b> Arame - AWS A5.23 EA2 (Ø 2,5) - Esab - OK Autrod 12.24 - Certificado Nº EC23388954 - Lote Nº PV217035834 Fluxo - AWS A5.23 F8A4 - ESAB - OK Flux 10.71 - Lote Nº VT412F426 Specification and classification electrode / rod: <b>Vazão do gás:</b> NA Flow rate gas: <b>Espessura metal soldado:</b> 25,4 mm Filler metal thickness: <b>Gás de proteção:</b> NA Shielded gas:										
<b>Controle de temperaturas</b> Welding temperature control										
<b>Tratamento térmico:</b> NA Post weld heat treatment: <b>Pós-aquecimento:</b> NA Post heat:										
<b>Técnicas de soldagem</b> Welding technique										
<b>Limpeza inicial:</b> Escovamento ou esmerilhamento Initial cleaning: Brushing or grinding <b>Corrente:</b> Contínua polaridade inversa - CC+ Current: Direct current electrode negative - DCEP <b>Modo de transferência:</b> NA Transfer mode: <b>Oscilação máxima:</b> Passes retilíneos Maximum wave bead: Stringer bead <b>Limpeza entre passes:</b> Escovamento ou esmerilhamento Interpass cleaning: Brushing or grinding										
<b>Velocidade de alimentação do arame:</b> de 0,6 a 1 m/min Wire feed speed: <b>Velocidade de soldagem:</b> de 10 a 15 cm/min. Speed travel: <b>Junta:</b> Topo penetração total com cobre junta / backing Joint design: <b>Ângulo do Eletrodo:</b> 90° Electrode Angle: <b>Ângulo de Trabalho:</b> 90° Work Angle:										
<b>Croqui da junta e da solda</b> Joint details										
										
<b>Parâmetros da soldagem</b> Welding procedure										
Processo	Eletrodo	Ø (mm)	Passes	Polaridade	Temperatura	Corrente	Tensão	Velocidade	Veloc. aliment.	Aporte térmico
SAW	F8AA/EA2	2,5	1	CC+	80 - 100	325 a 27	27 a 0,9	15 a 0	0,9 a 0,9	325,0
SAW	F8AA/EA2	2,5	2	CC+	100 - 170	425 a 30	30 a 0,7	10 a 0	0,7 a 0,7	425,0
SAW	F8AA/EA2	2,5	3	CC+	130 - 210	425 a 30	30 a 0,7	10 a 0	0,6 a 0,6	425,0
SAW	F8AA/EA2	2,5	4	CC+	130 - 210	425 a 30	30 a 0,8	10 a 0	0,6 a 0,6	425,0
SAW	F8AA/EA2	2,5	5	CC+	120 - 215	425 a 30	30 a 0,8	10 a 0	0,6 a 0,6	425,0
SAW	F8AA/EA2	2,5	6 e 7	CC+	110 - 270	425 a 30	30 a 0,8	13 a 0	1 a 1	425,0
SAW	F8AA/EA2	2,5	8 e 9	CC+	150 - 270	425 a 30	30 a 0,9	15 a 0	0,9 a 0,9	425,0
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div></div> <div> <b>Assinatura:</b>   <b>Data:</b>  </div> </div>										



 <b>ACC</b> INSPEÇÕES TÉCNICA		 <b>CODEME</b> CONSTRUÇÕES EM AÇO					
<b>REGISTRO DE QUALIFICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM</b> PROCEDURE QUALIFICATION RECORD							
<b>Empresa / Fabricante:</b> Codeme Company Name:		<b>FOLHA:</b> 2 / 2 Sheet:					
<b>RQPS qualificada por:</b> ACC Inspeções Técnicas PQR qualified by:		<b>RQPS N°:</b> 001/14 WPS N°:					
<b>Código / Norma:</b> AWS D1.1 ed 2010 Code:		<b>DATA:</b> 12/05/2014 Date:					
<b>Processo de soldagem:</b> SAW - Submerged Arc Welding Welding process: Submerged Arc Welding							
<b>Ensaio de Tração</b> Tensile test							
CP N° Specimen N°	Largura Width (mm)	Espessura Thickness (mm)	Área Area (mm²)	Limite de Resistência à Tração Tensile Stress		Local da Fratura Failure location	Laudo Resulted
				Real Actual (MPa)	Especificado Specified (MPa)		
TR-1	20,83	25,80	522,42	561,5	450	Metal de Base	Aprovado
TR-2	20,76	25,13	521,7	556,4	450	Metal de Base	Aprovado
Laboratório: Fundação Universidade de Itaipua Laboratory:							
Certificado N°: 227319 Laboratory test number:							
<b>Ensaio de Dobramento - Lateral</b> Guided bend test							
CP N° Specimen N°	Ângulo	Observações Remarks				Laudo Resulted	
D-01	180°	Não Houve Descontinuidade				Aprovado	
D-02	180°	Não Houve Descontinuidade				Aprovado	
D-03	180°	Não Houve Descontinuidade				Aprovado	
D-04	180°	Não Houve Descontinuidade				Aprovado	
Laboratório: Fundação Universidade de Itaipua Laboratory:							
Certificado N°: 227319 Laboratory test number:							
<b>Ensaio de Macrografia</b> Macro-examination							
Não aplicável (Not Applied)							
<b>Ensaio de Dureza</b> Hardness testing							
Não aplicável (Not Applied)							
<b>Ensaio de Impacto</b> Impact test							
Não aplicável (Not Applied)							
<b>Ensaio por Ultra-som</b> Ultrasonic examination							
Codeme - RA-04/14							
<b>Ensaio por Líquido Penetrante</b> Liquid penetration examination							
Não aplicável (Not Applied)							
<b>Ensaio por Radiografia</b> Radiographic examination							
Não aplicável (Not Applied)							
<b>Soldador</b> Welder:							
Vinício dos Santos - Sinete 4363							
<b>Anexos</b> Annex:							
Certificado do metal de base: ASTM A-572 Gr. 65 - USIMINAS - Certificado N° 3331294 - Corrida N° 584140 Base metal mills record:							
Certificado do consumível: Arame - AWS A5.23 E62 (Ø 2,5) - Esab - OK Autrod 12.24 - Certificado N° EC2338954 - Lote N° PV217035834 Fluxo - AWS A5.23 F8A4 - ESAB - OK Flux 10.71 - Lote N° VT412							
Relatório de ensaio de tração - Fundação Universidade de Itaipua N° 227319 Laboratory test n° (Tensile test):							
Relatório de ensaio de dobramento - Fundação Universidade de Itaipua N° 227319 Laboratory test n° (Guided bend test):							
<b>Observações</b> Remarks							
NA							
						Fiscalização:	
						Data:	




**UNIVERSIDADE DE ITAÚNA**

FACULDADE DE ENGENHARIA - LABORATÓRIO METALOGRAFICO

**CERTIFICADO Nº: 227319**
**INTERESSADO:** ACC INSPEÇÕES TÉCNICAS

**MATERIAL:** CHAPA DE AÇO SOLDADA

**NATUREZA DO TRABALHO:** ENSAIO DE TRAÇÃO E DOBRAMENTO

**Planilha de Ensaio:** 140816 **Tipo:** Ensaio de Tração e Dobramento

**ENSAIO DE TRAÇÃO**

Item	C.P	Dimensões (mm)	Área Seção (mm²)	Carga (Kgf)	Resist. (MPa)	Observações
1	1	25,08 x 20,83	522,42	29904	561,5	Rompeu Fora da solda.
2	1	25,13 x 20,76	521,70	29587	556,4	Rompeu Fora da solda.

\*\*\*Maquina Universal de Ensaio, tipo mecânica, marca Emic modelo DL 20000, NO 11441, NS094. Está calibrada pela ABNT NBR ISO/IEC 17025. CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº586/13, emitido pelo Emic-Dcame Laboratorio de Calibração acreditado pela Cgcre. Acreditado pela RBC-CAL-0197.

**ENSAIO DE DOBRAMENTO**

Item	C.P	Dimensões (mm)	Diâmetro Cutelo (mm)	Ângulo de Dobramento	Dobramento	Observações
1	1	25,04mm x 9,51mm	38	180°	LATERAL	Não Houve descontinuidade.
2	1	25,04mm x 9,51mm	38	180°	LATERAL	Não Houve descontinuidade.
3	1	25,04mm x 9,51mm	38	180°	LATERAL	Não Houve descontinuidade.
4	1	25,04mm x 9,51mm	38	180°	LATERAL	Não Houve descontinuidade.

**Dados fornecidos pelo Cliente:**

Empresa: Codeme

Material de Base: ASTM A-572 Gr 65

Consumível: F8A4 + EA2

Processo: SAW

Espessura: 25,4 mm



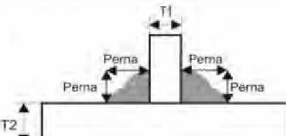
Posição: 1G

Soldador: Vinício dos Santos Sinete:4363



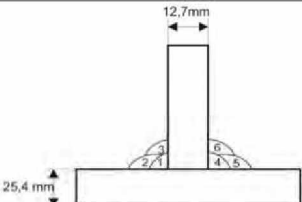
Normas: AWS D1.1 ASME IX



O presente resultado refere-se exclusivamente às amostras enviadas pelo Interessado.

Itaúna, 12 de Maio de 2014

 <b>ACC</b> INSPEÇÕES TÉCNICA										
<b>ESPECIFICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM</b> WELDING PROCEDURE SPECIFICATION										
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <b>Empresa / Fabricante:</b> Codeme  <b>Company Name:</b>  <b>EPS qualificada por:</b> RQPS Nº 001/14 e RQPS Nº 002/14  <b>WPS supporting by:</b>  <b>Código / Norma:</b> AWS D1.1 ed 2010  <b>Code:</b>  <b>Processo de soldagem:</b> SAW - Submerged Arc Welding - Twin Arc  <b>Welding process:</b> Submerged Arc Welding - Twin Arc         </div> <div style="text-align: right;"> <b>FOLHA:</b> 1 / 1  <b>Sheet:</b>  <b>EPS Nº:</b> 002/14  <b>WPS Nº:</b>  <b>DATA:</b> 12/05/2014  <b>Date:</b> </div> </div>										
<b>Metal de base</b> Base Metals										
<b>Metal de base:</b> USI Sincron-BHS-450M (AWS D1.1 2010 Tabela 3.1 Grupo III) x USI Sincron-BHS-450M (AWS D1.1 2010 Tabela 3.1 Grupo III) <b>Base Metal:</b> <b>Espessura:</b> de 3,2mm a ilimitado <b>Thickness:</b> 1/8" to Unlimited <b>Progressão de soldagem:</b> NA <b>Welding progress:</b> <b>Posição de soldagem:</b> 2F / 1F - Plana e Horizontal <b>Groove position:</b>										
<b>Metais de adição</b> Filler Metals										
<b>Eletrodo / arame:</b> Arame - AWS A5.23 EA2 (Ø ≤ 3,97) <b>Fluxo - AWS A5.23 F8A4</b> <b>Specification and classification electrode / rod:</b> <b>Vasão do Gás:</b> NA <b>Flow rate gas:</b> <b>Perna de Solda:</b> ≥ 8,0mm Para passe múltiplo <b>Weld Leg Size:</b> ≥ 1/4" for multipass <b>Gás de proteção:</b> NA <b>Shielded gas:</b>										
<b>Controle de temperaturas</b> Welding temperature control										
<b>Tratamento térmico:</b> NA <b>Post weld heat treatment:</b> <b>Pós-aquecimento:</b> NA <b>Post heat:</b> <b>Máxima temperatura interpasse:</b> (*1) 270 °C <b>Interpass maximum temperature:</b>										
<b>Técnicas de soldagem</b> Welding technique										
<b>Limpeza inicial:</b> Escovamento ou esmerilhamento <b>Initial cleaning:</b> Brushing or grinding <b>Corrente:</b> Contínua polaridade Inversa - CC+ <b>Current:</b> Direct current electrode positive - DCEP <b>Modo de transferência:</b> NA <b>Transfer mode:</b> Globular <b>Junta:</b> Junta em ângulo <b>Joint design:</b> Fillet weld <b>Limpeza entre passes:</b> Escovamento ou esmerilhamento <b>Interpass cleaning:</b> Brushing or grinding										
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <b>Velocidade de Alimentação do Arame:</b> 4,6 a 6,0 m/min.  <b>Wire feed speed:</b>  <b>Velocidade de Soldagem:</b> de 53 a 94cm/min  <b>Speed travel:</b>  <b>Oscilação máxima:</b> Passes retilíneos  <b>Maximum wave board:</b> Stringer bead  <b>Ângulo de Trabalho:</b> 45° ± 10°  <b>Work Angle:</b>  <b>Ângulo do Eletrodo:</b> 45° ± 10°  <b>Electrode Angle:</b> </div> </div>										
<b>Croqui da junta e da solda</b> Joint details										
<div style="display: flex; align-items: center;">  <div style="margin-left: 20px;"> <b>Abertura das Juntas:</b> 0,0mm  <b>Perna de Solda para Passe Múltiplo:</b> ≥ 8,0mm  <b>EPS específica para Soldagem com dupla fusão, sendo dois eletrodos opostos pela alma com ângulos de 45° ± 10° na posição horizontal.</b> </div> </div>										
<b>Parâmetros da soldagem</b> Welding procedure										
Processo Process	Eletrodo Electrod	Ø (mm)	Passe Pass	Polaridade Current	Temperatura (° C) (*1)	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade (cm/min)	Veloc. aliment. arame (m/min)	Aporte térmico (Heat input max. (J/cm) (*2)
SAW	F8A4/EA2	≤ 3,97	Primeiro	CC+	23 - 350	428 a 523	28 a 32	53 a 88	4,6	12-113
SAW	F8A4/EA2	≤ 3,97	Demais	CC+	23 - 350	428 a 523	28 a 32	53 a 94	6,0	12-113
<b>Observações</b> Remarks										
(*1) Ver acima valores de pré-aquecimento e temperatura de interpasse (*2) Heat input máximo aplicável somente quando exigido em documentos contratuais. (*3) Esta EPS não se aplica a equipamentos com requisito de controle de tenacidade e/ou sujeito a tratamento térmico de alívio de tensões.										
<b>Engenharia</b> Engineering  <b>Data:</b> Date						<b>Fiscalização:</b> Authorized  <b>Data:</b> Date				



 <b>ACC</b> INSPEÇÕES TÉCNICA	 <b>CODEME</b> CONSTRUÇÕES EM AÇO									
<b>REGISTRO DE QUALIFICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM</b> PROCEDURE QUALIFICATION RECORD										
<b>Empresa / Fabricante:</b> Codeme <b>Company Name:</b> RQPS qualificada por: ACC Inspeções Técnicas <b>RQPS qualificada por:</b> ACC Inspeções Técnicas <b>WPS Nº:</b> 002/14 <b>WPS Nº:</b> 002/14 <b>Código / Norma:</b> AWS D1.1 ed 2010 <b>Code:</b> <b>Processo de soldagem:</b> SAW - Submerged Arc Welding - Twin Arc <b>Welding process:</b> Submerged Arc Welding - Twin Arc <b>DATA:</b> 12/05/2014 <b>Date:</b>										
<b>Metal de base</b> Base Metals										
<b>Metal de base:</b> USI Sincron-BHS-450M (ASTM A-572 Gr. 65) <b>Base Metal:</b> <b>Espessura:</b> 25,4 mm x 12,7mm <b>Thickness:</b> <b>Ø nominal:</b> NA - Chapa <b>Ø nominal:</b> NA - Plate <b>Progressão de soldagem:</b> NA <b>Welding progress:</b> <b>Posição de soldagem:</b> 2F - Horizontal <b>Groove position:</b>										
<b>Metais de adição</b> Filler metals										
<b>Eletrodo / arame:</b> Arame - AWS A5.23 EA2 (Ø 2,5) - Esab - OK Autrod 12.24 - Certificado Nº EC23388954 - Lote Nº PV217035834 <b>Fluxo - AWS A5.23 F8A4 - ESAB - OK Flux 10.71 - Lote Nº VT412F426</b> <b>Specification and classification electrode / rod:</b> <b>Vazão de gás:</b> NA <b>Flow rate gas:</b> <b>A number:</b> NA <b>F number:</b> NA <b>Perna de Solda:</b> 10,0 mm <b>Filler metal thickness:</b> <b>F number:</b> <b>Gás de proteção:</b> NA <b>Shielded gas:</b>										
<b>Controle de temperaturas</b> Welding temperature control										
<b>Tratamento térmico:</b> NA <b>Post weld heat treatment:</b> <b>Pré-aquecimento:</b> 80°C <b>Pós-aquecimento:</b> NA <b>Post heat:</b> <b>Máxima temperatura interpasse:</b> 240°C <b>Interpass maximum temperature:</b>										
<b>Técnicas de soldagem</b> Welding technique										
<b>Limpeza inicial:</b> Escovamento ou esmerilhamento <b>Initial cleaning:</b> Brushing or grinding <b>Corrente:</b> Contínua polaridade inversa - CC+ <b>Current:</b> Direct current electrode negative - DCEP <b>Modo de transferência:</b> NA <b>Transfer mode:</b> <b>Oscilação máxima:</b> Passes retilíneos <b>Maximum weave beads:</b> Stringer bead <b>Limpeza entre passes:</b> Escovamento ou esmerilhamento <b>Interpass cleaning:</b> Brushing or grinding <b>Velocidade de alimentação do arame:</b> de 4,1 a 5,5 m/min. <b>Wire feed speed:</b> <b>Velocidade de soldagem:</b> de 71 a 75 cm/min. <b>Speed travel:</b> <b>Junta:</b> Junta em ângulo/ Solda em ângulo <b>Joint design:</b> <b>Ângulo do Eletrodo:</b> 45° <b>Electrode Angle:</b> <b>Ângulo de Trabalho:</b> 45° <b>Work Angle:</b>										
<b>Croqui da junta e da solda</b> Joint details										
										
<b>Parâmetros da soldagem</b> Welding procedure										
Processo	Eletrodo	Ø	Passe	Polaridade	Temperatura	Corrente	Tensão	Velocidade	Veloc. aliment	Aporte térmico
Process	Electrod	(mm)	Pass	Current	(° C)	(A)	(V)	(cm/min)	aramé (m/min)	(Heat input) max. (J/cm)
SAW	F8A4/EA2	2,35	1	CC+	80 - 200	475 a 30	30 a 4,1	71 a 0	4,1 a 4,1	12.112,5
SAW	F8A4/EA2	2,35	2	CC+	130 - 240	475 a 30	30 a 5,2	71 a 0	5,2 a 5,2	12.112,5
SAW	F8A4/EA2	2,35	3	CC+	130 - 240	475 a 30	30 a 5,2	75 a 0	4,4 a 4,4	11.400,0
SAW	F8A4/EA2	2,35	4	CC+	80 - 200	475 a 30	30 a 4,4	71 a 0	4,1 a 4,1	12.112,5
SAW	F8A4/EA2	2,35	5	CC+	130 - 240	475 a 30	30 a 4,1	71 a 0	4,1 a 4,1	12.112,5
SAW	F8A4/EA2	2,35	6	CC+	130 - 240	475 a 30	30 a 5,5	75 a 0	5,5 a 5,5	11.400,0
<b>Assinatura</b>  <b>Data:</b>										

 <b>ACC</b> INSPEÇÕES TÉCNICA		 <b>CODEME</b> CONSTRUÇÕES EM AÇO				
<b>REGISTRO DE QUALIFICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM</b> PROCEDURE QUALIFICATION RECORD						
<b>Empresa / Fabricante:</b> Codeme <b>Company Name:</b> <b>RQPS qualificada por:</b> ACC Inspeções Técnicas <b>PQR qualified by:</b> <b>Código / Norma:</b> AWS D1.1 ed 2010 <b>Center:</b> <b>Processo de soldagem:</b> SAW - Submerged Arc Welding - Twin Arc <b>Welding process:</b> Submerged Arc Welding - Twin Arc		<b>FOLHA:</b> 2 / 2 <b>Sheet:</b> <b>RQPS Nº:</b> 002/14 <b>WPS Nº:</b> <b>DATA:</b> 12/05/2014 <b>Date:</b>				
<b>Ensaio de Tração</b> Tensile test Não aplicável (Not Applied)						
<b>Ensaio de Dobramento - Lateral</b> Guided bend test Não aplicável (Not Applied)						
<b>Ensaio de Macrografia</b> Macro-examination						
CP Nº	Perna de Solda (mm) Weld Leg Size (mm)				Observações	Laudo
Specimen Nº	S1	S2	S3	S4	Remarks	Resulted
M-01	13	12	13	9	Fusão completa, isenta de descontinuidades	Aprovado
M-02	14	9	13	10	Fusão completa, isenta de descontinuidades	Aprovado
M-03	15	13	15	9	Fusão completa, isenta de descontinuidades	Aprovado
M-04	15	8	12	9	Fusão completa, isenta de descontinuidades	Aprovado
M-05	15	11	12	10	Fusão completa, isenta de descontinuidades	Aprovado
Laboratório: Fundação Universidade de Itaipua Laboratory: Certificados Nº: 227320/ 227321/ 227322/ 227323/ 227324 Laboratory test number						
<b>Ensaio de Dureza</b> Hardness testing Não aplicável (Not Applied)						
<b>Ensaio de Impacto</b> Impact test Não aplicável (Not Applied)						
<b>Ensaio por Ultra-som</b> Ultrasonic examination Codeme - RA-03/14						
<b>Ensaio por Líquido Penetrante</b> Liquid penetration examination Não aplicável (Not Applied)						
<b>Ensaio por Radiografia</b> Radiographic examination Não aplicável (Not Applied)						
<b>Soldador</b> Welder Ruimar Cardoso Pereira Júnior - Sinete D8 / Uliam de Araújo Cruz - Sinete E5						
<b>Anexos</b> Annex						
Certificado do metal de base: ASTM A-572 Gr. 65 - USIMINAS - Certificado Nº 3331294 - Corrida Nº 594140 - T: 25,4mm/ USIMINAS - Certificado Nº 3338525 - Corrida Nº 594140 - T: 12,7mm Base metal mill record: Certificado do consumível: Arame - AWS A5.23 EA2 (Ø 2,5) - Esab - OK Autrod 12.24 - Certificado Nº EC23388954 - Lote Nº PV217035834 Fluxo - AWS A5.23 F8A4 - ESAB - OK Flux 10.71 - Lote Nº VT412F425 Relatórios Macrográficos - Fundação Universidade de Itaipua Nº 227320/ 227321/ 227322/ 227323/ 227324 Macro test nº (Tensile test):						
<b>Observações</b> Remarks						
NA						
					Fiscalização:  Data: Date:	





**UNIVERSIDADE DE ITAÚNA**

FACULDADE DE ENGENHARIA - LABORATÓRIO METALGRÁFICO

**CERTIFICADO Nº: 227320**

**INTERESSADO:** ACC INSPEÇÕES TÉCNICAS

**MATERIAL:** CHAPA DE AÇO SOLDADA

**NATUREZA DO TRABALHO:** MACROGRAFIA DE SOLDA

**Planilha de Ensaio:** 140817 **Tipo:** Análise Metalográfica

Informações fornecidas pelo interessado:

**Cliente:** Codeme

**Material de Base:** ASTM A-572 Gr 65

**Material de Adição:** F8A4 + EA2

**Posição de Soldagem:** 2F

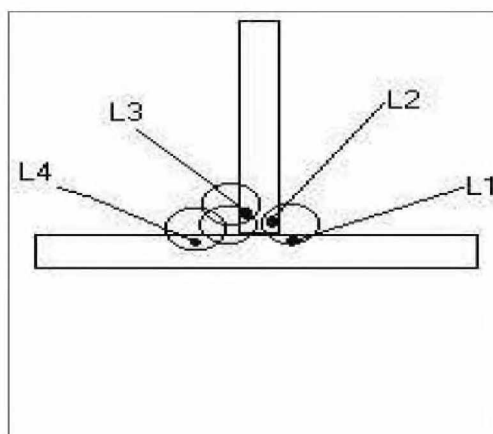
**Processo de Soldagem:** SAW

**Espessura:** 12,5 x 25,4 mm

**Soldador:** Ruimar Cardoso Pereira Sinete:D8

- Uilian de Araujo Cruz Sinete:E8

**Norma:** AWS D1.1 / ASME IX



**Laudo:** Face:16,82 mm

Raiz:18,02 mm

Face:16,45 mm

Raiz:13,28 mm

O presente resultado refere-se exclusivamente às amostras enviadas pelo Interessado.

Observações:

Qualificação de Procedimento de Soldagem:

"O exame da seção transversal do metal depositado e da zona termicamente afetada, mostra completa fusão, livre de trincas, inclusões ou porosidades".

Itaúna, 12 de Maio de 2014





**UNIVERSIDADE DE ITAÚNA**

FACULDADE DE ENGENHARIA - LABORATÓRIO METALGRÁFICO

### **CERTIFICADO Nº: 227321**

**INTERESSADO:** ACC INSPEÇÕES TÉCNICAS

**MATERIAL:** CHAPA DE AÇO SOLDADA

**NATUREZA DO TRABALHO:** MACROGRAFIA DE SOLDA

**Planilha de Ensaio:** 140818 **Tipo:** Análise Metalográfica

Informações fornecidas pelo interessado:

**Cliente:** Codeme

**Material de Base:** ASTM A-572 Gr 65

**Material de Adição:** F8A4 + EA2

**Posição de Soldagem:** 2F

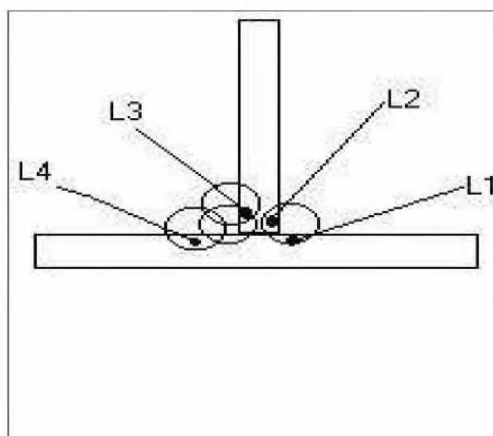
**Processo de Soldagem:** SAW

**Espessura:** 12,5 x 25,4 mm

**Soldador:** Ruimar Cardoso Pereira Sinete:D8

- Uilian de Araujo Cruz Sinete:E8

**Norma:** AWS D1.1 / ASME IX



**Laudos:** Face:16,12 mm

Raiz:15,64 mm

Face:15,62 mm

Raiz:12,73 mm

O presente resultado refere-se exclusivamente às amostras enviadas pelo Interessado.

Observações:

Qualificação de Procedimento de Soldagem:

"O exame da seção transversal do metal depositado e da zona termicamente afetada, mostra completa fusão, livre de trincas, inclusões ou porosidades".

Itaúna, 12 de Maio de 2014



**UNIVERSIDADE DE ITAÚNA**

FACULDADE DE ENGENHARIA - LABORATÓRIO METALGRÁFICO

**CERTIFICADO Nº: 227322**

**INTERESSADO:** ACC INSPEÇÕES TÉCNICAS

**MATERIAL:** CHAPA DE AÇO SOLDADA

**NATUREZA DO TRABALHO:** MACROGRAFIA DE SOLDA

**Planilha de Ensaio:** 140819 **Tipo:** Análise Metalográfica

Informações fornecidas pelo interessado:

**Cliente:** Codeme

**Material de Base:** ASTM A-572 Gr 65

**Material de Adição:** F8A4 + EA2

**Posição de Soldagem:** 2F

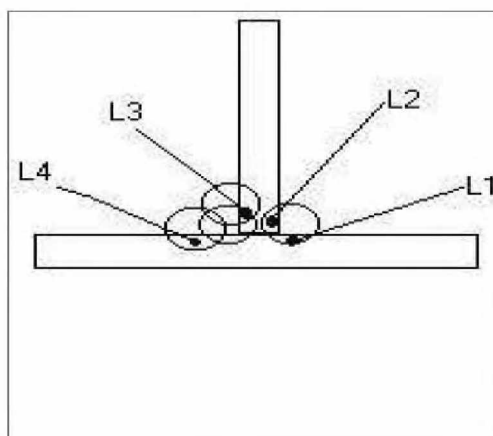
**Processo de Soldagem:** SAW

**Espessura:** 12,5 x 25,4 mm

**Soldador:** Ruimar Cardoso Pereira Sinete:D8

- Uilian de Araujo Cruz Sinete:E8

**Norma:** AWS D1.1 / ASME IX



**Laudos:** Face:17,28 mm

Raiz:16,49 mm

Face:16,36 mm

Raiz:13,74 mm

O presente resultado refere-se exclusivamente às amostras enviadas pelo Interessado.

Observações:

Qualificação de Procedimento de Soldagem:

"O exame da seção transversal do metal depositado e da zona termicamente afetada, mostra completa fusão, livre de trincas, inclusões ou porosidades".

Itaúna, 12 de Maio de 2014



**UNIVERSIDADE DE ITAÚNA**

FACULDADE DE ENGENHARIA - LABORATÓRIO METALGRÁFICO

**CERTIFICADO Nº: 227323**

**INTERESSADO:** ACC INSPEÇÕES TÉCNICAS

**MATERIAL:** CHAPA DE AÇO SOLDADA

**NATUREZA DO TRABALHO:** MACROGRAFIA DE SOLDA

**Planilha de Ensaio:** 140820 **Tipo:** Análise Metalográfica

Informações fornecidas pelo interessado:

**Cliente:** Codeme

**Material de Base:** ASTM A-572 Gr 65

**Material de Adição:** F8A4 + EA2

**Posição de Soldagem:** 2F

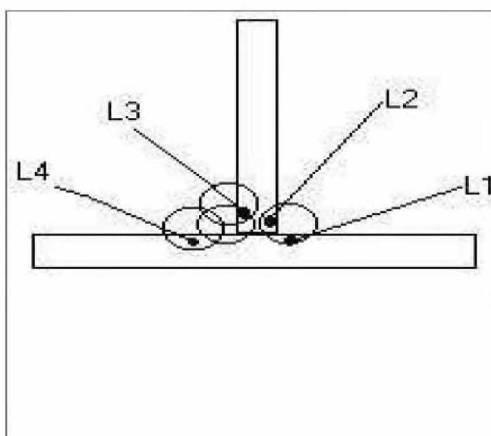
**Processo de Soldagem:** SAW

**Espessura:** 12,5 x 25,4 mm

**Soldador:** Ruimar Cardoso Pereira Sinete:D8

- Uilian de Araujo Cruz Sinete:E8

**Norma:** AWS D1.1 / ASME IX



**Laudos:** Face:17,76 mm

Raiz:16,90 mm

Face:15,02 mm

Raiz:13,82 mm

O presente resultado refere-se exclusivamente às amostras enviadas pelo Interessado.

Observações:

Qualificação de Procedimento de Soldagem:

"O exame da seção transversal do metal depositado e da zona termicamente afetada, mostra completa fusão, livre de trincas, inclusões ou porosidades".

Itaúna, 12 de Maio de 2014



**UNIVERSIDADE DE ITAÚNA**

FACULDADE DE ENGENHARIA - LABORATÓRIO METALGRÁFICO

**CERTIFICADO Nº: 227324**

**INTERESSADO:** ACC INSPEÇÕES TÉCNICAS

**MATERIAL:** CHAPA DE AÇO SOLDADA

**NATUREZA DO TRABALHO:** MACROGRAFIA DE SOLDA

**Planilha de Ensaio:** 140821 **Tipo:** Análise Metalográfica

Informações fornecidas pelo interessado:

**Cliente:** Codeme

**Material de Base:** ASTM A-572 Gr 65

**Material de Adição:** F8A4 + EA2

**Posição de Soldagem:** 2F

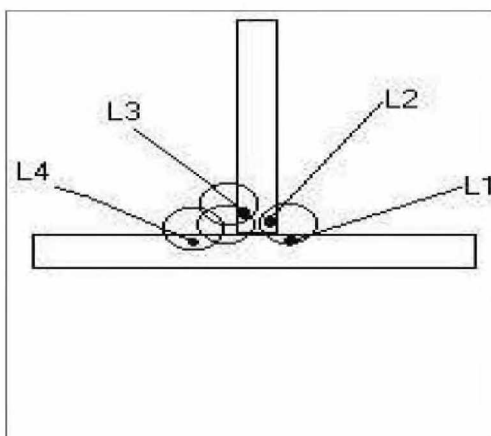
**Processo de Soldagem:** SAW

**Espessura:** 12,5 x 25,4 mm

**Soldador:** Ruimar Cardoso Pereira Sinete:D8

- Uilian de Araujo Cruz Sinete:E8

**Norma:** AWS D1.1 / ASME IX



**Laudos:** Face:17,41 mm

Raiz:16,88 mm

Face:15,90 mm

Raiz:14,63 mm

O presente resultado refere-se exclusivamente às amostras enviadas pelo Interessado.



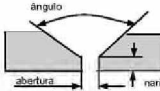
Observações:

Qualificação de Procedimento de Soldagem:



"O exame da seção transversal do metal depositado e da zona termicamente afetada, mostra completa fusão, livre de trincas, inclusões ou porosidades".

Itaúna, 12 de Maio de 2014



	<b>ACC</b> INSPEÇÕES TÉCNICA																										
<b>ESPECIFICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM</b> WELDING PROCEDURE SPECIFICATION																											
Empresa / Fabricante: Codeme Company Name:		FOLHA: 1 / 1 Sheet:																									
EPS qualificada por: RQPS Nº 003/14 WPS supporting by:		EPS Nº: 003/14 WPS Nº:																									
Código / Norma: AWS D1.1 ed 2010 Code:		DATA: 12/05/2014 Date:																									
Processo de soldagem: FCAW - Flux Cored Arc Welding Welding process:																											
<b>Metal de base</b> Base Metals																											
Metal de base: USI Sincron-BHS-450M (AWS D1.1 2010 Tabela 3.1 Grupo III) + CIVIL 350 Base Metal: USI Sincron-BHS-450M (AWS D1.1 2010 Table 3.1 Group III) + CIVIL 350																											
Espessura: de 3,2 mm a ilimitado (*5) Thickness: 1/8" at Unlimited		Ø nominal: ≥ 610,0mm para soldas em chanfro. Ilimitada para soldas em ângulo Ø nominal: ≥ 24" for butt welds. Unlimited for fillet weld																									
Progressão de soldagem: NA Welding progress:																											
Posição de soldagem: 1G/ 1F - Plana Groove position:																											
<b>Metais de adição</b> Filler Metals																											
Eletrodo / arame: AWS A 5.20 - E71T-1C (Ø ≤ 1,2mm) Specification and classification electrode / rod:																											
Vazão do Gás: 11,25 a 22,5 l/min Flow rate gas:		A number: NA F number: NA																									
Espessura metal soldado: de 3,2 mm a ilimitado Filler metal thickness: 1/8" at Unlimited																											
Gás de proteção: 99,99% CO <sub>2</sub> Shielded gas:																											
<b>Controle de temperaturas</b> Welding temperature control																											
Tratamento térmico: NA Post weld heat treatment:		Pré-aquecimento mínimo: (*1) 80°C Minimum pre-heat:																									
Pós-aquecimento: NA Post heat:																											
Máxima temperatura interpasso: (*1) 270°C Interpass maximum temperature:																											
<b>Técnicas de soldagem</b> Welding technique																											
Limpeza inicial: Escovamento ou esmerilhamento Initial cleaning: Brushing or grinding		Limpeza entre passes: Escovamento ou esmerilhamento Interpass cleaning: Brushing or grinding																									
Corrente: Contínua polaridade inversa - CC+ Current: Direct current electrode positive - DCEP		Velocidade de Alimentação do Arame: máximo 5 m/min Wire feed speed:																									
Modo de transferência: NA Transfer mode: NA		Velocidade de Soldagem: de 10 a 20cm/min Speed travel:																									
Junta: Topo penetração total com cobre-junta ou extração de raiz / Junta em ângulo Joint design: Butt weld joint - complete penetration with backing or backgouged / Fillet weld		Oscilação máxima: Passes retilíneos Maximum wave bead: Stringer bead																									
<b>Croqui da junta e da solda</b> Joint details																											
		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Tipo de chanfro</th> <th>Ângulo do chanfro</th> <th>Nariz (mm)</th> <th>Raiz (mm)</th> <th>Tipo de cobre-junta</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>V</td> <td>60° +10° -5°</td> <td>1 a 3</td> <td>2 a 8</td> <td>backing</td> </tr> <tr> <td>1/2 V</td> <td>45° +10° -5°</td> <td>1 a 3</td> <td>2 a 8</td> <td>backing</td> </tr> <tr> <td>V</td> <td>60° +10° -5°</td> <td>1 - 2</td> <td>0 - 4</td> <td>backgouged</td> </tr> <tr> <td>1/2 V</td> <td>45° +10° -5°</td> <td>1 - 2</td> <td>0 - 4</td> <td>backgouged</td> </tr> </tbody> </table>	Tipo de chanfro	Ângulo do chanfro	Nariz (mm)	Raiz (mm)	Tipo de cobre-junta	V	60° +10° -5°	1 a 3	2 a 8	backing	1/2 V	45° +10° -5°	1 a 3	2 a 8	backing	V	60° +10° -5°	1 - 2	0 - 4	backgouged	1/2 V	45° +10° -5°	1 - 2	0 - 4	backgouged
Tipo de chanfro	Ângulo do chanfro	Nariz (mm)	Raiz (mm)	Tipo de cobre-junta																							
V	60° +10° -5°	1 a 3	2 a 8	backing																							
1/2 V	45° +10° -5°	1 a 3	2 a 8	backing																							
V	60° +10° -5°	1 - 2	0 - 4	backgouged																							
1/2 V	45° +10° -5°	1 - 2	0 - 4	backgouged																							
Qualificado todas as configurações de chanfros, apresentadas nas figuras 3.3 e 3.4 da norma AWS D1.1 2010																											
<b>Parâmetros da soldagem</b> Welding procedure																											
Processo Process	Eletrodo Electrod	Ø (mm)	Passe Pass	Polaridade Current	Temperatura (° C)	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade (cm/min)	Veloc. aliment. Arame Max. (cm/min)	Aporte térmico (Heat Input) max. (J/cm)																	
FCAW	E71T-1C	≤ 1,2	Primeiro	CC+	80 - 270	205 a 251	26 a 30	10 a 16	4	31.385																	
FCAW	E71T-1C	≤ 1,2	Demais	CC+	125 - 270	3 a 276	26 a 32	10 a 20	5,2	31.365																	
<b>Observações</b> Remarks																											
(*1) Ver acima valores de pré-aquecimento e temperatura de interpasso																											
(*2) Heat input máximo adicível somente quando existido em documentos contratuais.																											
controle de tenacidade e/ou sujeito a tratamento térmico de alívio de tensões.																											
as meta-juntas.																											
de 10,0mm																											
Data:																											
Fiscalização:																											
Data:																											



 <b>ACC</b> INSPEÇÕES TÉCNICA		 <b>CODEME</b> CONSTRUÇÕES EM AÇO				
<b>REGISTRO DE QUALIFICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM</b> PROCEDURE QUALIFICATION RECORD						
<b>Empresa / Fabricante:</b> Codeme Company Name:		<b>FOLHA:</b> 2 / 2 Sheet:				
<b>RQPS qualificada por:</b> ACC Inspeções Técnicas RQPS qualified by:		<b>RQPS N°:</b> 003/14 WPS N°:				
<b>Código / Norma:</b> AWS D1.1 ed 2010. Code:						
<b>Processo de soldagem:</b> FCAW - Flux Cored Arc Welding Welding process:		<b>DATA:</b> 12/05/2014 Date:				
<b>Ensaio de Tração</b> Tensile test						
CP N° Specimen N°	Largura Width (mm)	Espessura Thickness (mm)	Área Area (mm²)	Limite de Resistência à Tração Tensile Stress	Local da Fratura Failure location	Laudo Result
TR-1	20,92	24,76	517,98	Real Actual (MPa) 525,3	Especificado Specified (MPa) 450 (ver obs. 1)	Solda
TR-2	20,92	24,73	517,35	520	450 (ver obs. 1)	Solda
Laboratório: Fundação Universidade de Itaipua Laboratory:						
Certificado N°: 227333 Laboratory test number:						
<b>Ensaio de Dobramento - Lateral</b> Guided bend test						
CP N° Specimen N°	Ângulo	Observações Remarks	Laudo Result			
D-01	180°	Não Houve Descontinuidade	Aprovado			
D-02	180°	Não Houve Descontinuidade	Aprovado			
D-03	180°	Não Houve Descontinuidade	Aprovado			
D-04	180°	Não Houve Descontinuidade	Aprovado			
Laboratório: Fundação Universidade de Itaipua Laboratory:						
Certificado N°: 227333 Laboratory test number:						
<b>Ensaio de Macrografia</b> Macro-examination						
Não aplicável (Not Applied)						
<b>Ensaio de Dureza</b> Hardness testing						
Não aplicável (Not Applied)						
<b>Ensaio de Impacto</b> Impact test						
Não aplicável (Not Applied)						
<b>Ensaio por Ultra-som</b> Ultrasonic examination						
Codeme RA-01/14						
<b>Ensaio por Líquido Penetrante</b> Liquid penetration examination						
Não aplicável (Not Applied)						
<b>Ensaio por Radiografia</b> Radiographic examination						
Não aplicável (Not Applied)						
<b>Soldador</b> Welder						
Leonardo Medeiros - Sinete C3						
<b>Anexos</b> Annex						
Certificado do metal de base: USI Sincron-BHS-450M - Usiminas - Certificado N° 3331294 - Corrida N° 594140 / CIVIL 350 - Usiminas - Certificado N° 3237804 - Corrida N° 327828 Base metal mill record:						
Certificado do consumível: AWS A5.20/5.20M E71T-1C(M) H5(Ø 1,2mm) - Bohler - CERTIFICADO N° 2014-000098959-1-004 Filler metals record:						
Relatório de ensaio de tração - Fundação Universidade de Itaipua N° 227333 Laboratory test n° (Tensile test):						
Relatórios de ensaio de dobramento - Fundação Universidade de Itaipua N° 227333 Laboratory test n° (Guided test bend):						
<b>Observações</b> Remarks						
OBS 1. Resistência a tração especificada para Metal de Base ASTM A572 Gr. 65						
				Fiscalização:		
				Data:		






**UNIVERSIDADE DE ITAÚNA**

FACULDADE DE ENGENHARIA - LABORATÓRIO METALOGRAFICO

**CERTIFICADO Nº: 227317**
**INTERESSADO:** ACC INSPEÇÕES TÉCNICAS

**MATERIAL:** CHAPA DE AÇO SOLDADA

**NATUREZA DO TRABALHO:** ENSAIO DE TRAÇÃO E DOBRAMENTO

**Planilha de Ensaio:** 140814 **Tipo:** Ensaio de Tração e Dobramento

**ENSAIO DE TRAÇÃO**

Item	C.P	Dimensões (mm)	Área Seção (mm²)	Carga (Kgf)	Resist. (MPa)	Observações
1	1	20,92 x 24,76	517,98	27738	525,3	Rompeu na solda.
2	1	20,92 x 24,73	517,35	27421	520,0	Rompeu na solda.

\*\*\*Máquina Universal de Ensaio, tipo mecânica, marca Emic modelo DL 20000, NO 11441, NS094. Está calibrada pela ABNT NBR ISO/IEC 17025. CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº586/13, emitido pelo Emic-Dcame Laboratório de Calibração acreditado pela Cgcre. Acreditado pela RBC-CAL-0197.

**ENSAIO DE DOBRAMENTO**

Item	C.P	Dimensões (mm)	Diâmetro Cutelo (mm)	Ângulo de Dobramento	Dobramento	Observações
1	1	25,04mm x 9,51mm	38	180°	LATERAL	Não Houve descontinuidade.
2	1	25,04mm x 9,51mm	38	180°	LATERAL	Não Houve descontinuidade.
3	1	25,04mm x 9,51mm	38	180°	LATERAL	Não Houve descontinuidade.
4	1	25,04mm x 9,51mm	38	180°	LATERAL	Não Houve descontinuidade.

**Dados fornecidos pelo Cliente:**

Empresa: Codeme

Material de Base: ASTM A-572 Gr 65

Consumível: E81 - 9C

Processo: FCAW

Espessura: 25,0 mm



Posição: 1G



Soldador: Leonardo Medeiros Sinete: C3



Normas: AWS D1.1 ASME IX



O presente resultado refere-se exclusivamente às amostras enviadas pelo Interessado.

Itaúna, 12 de Maio de 2014



 <b>ACC Inspeções Técnicas</b>			
<b>Certificado de Qualificação de Soldador - CQS</b> Welder Qualification Certificate - WQC			
<b>SAW - Submerged Arc Welding</b>		<b>CQS Nº:</b> 007/14	<b>Revisão:</b> 00
<b>Nome:</b> Vinício dos Santos		<b>Sinete:</b> 4363	<b>Data:</b> 12/05/2014
<b>Norma:</b> AWS D1.1 - 2010		<b>EPS (Rev.):</b> 001/14	<b>Identidade:</b> NA
<b>Processo de Soldagem:</b> SAW - Submerged Arc Welding (SAW)			
<small>Welding Process: SAW - Submerged Arc Welding (SAW)</small>			
<b>Variáveis</b>	<b>Condições do Teste</b>	<b>Faixa de Aplicação</b>	
<small>Variables</small>	<small>Test Conditions</small>	<small>Application Application</small>	
<b>Processo:</b>	SAW	SAW	
<small>Welding process</small>			
<b>Posições:</b>	Chapa - 1G	1G / 1F	
<small>Groove positions</small>	<small>Plate - 1G</small>		
<b>Progressão de Soldagem:</b>	NA	NA	
<small>Welding Progress</small>			
<b>Metal base:</b>	Usiminas Sincron-BHS-450M (ASTM A-572 Gr. 65)	Todos os listados AWS D1.1 2010, e qualificados	
<small>Base metal</small>		<small>All listed AWS D1.1 2010, and qualified</small>	
<b>Espessura do metal base:</b>	25,4mm	de 3,2 a ilimitado	
<small>Base metal thickness</small>	<small>1"</small>		
<b>Espessura do metal soldado:</b>	25,4mm	NA	
<small>Filler metal thickness</small>	<small>1"</small>		
<b>Diâmetro externo do tubo:</b>	Chapa - 1G	≥ 610,0 mm	
<small>Extern diameter of pipe</small>	<small>Plate - 1G</small>	<small>≥ 24"</small>	
<b>Tipo de junta:</b>	Topo	Todas	
<small>Joint design</small>	<small>Butt</small>	<small>All</small>	
<b>Raiz abertura / face:</b>	3,0 mm	Todas	
<small>Root opening</small>		<small>All</small>	
<b>Cobre-junta:</b>	Sim	Com cobre-junta ou extração de raiz	
<small>Backing</small>	<small>Added</small>	<small>With backing or backgouged</small>	
<b>Tipo de Solda:</b>	Penetração total	Todas	
<small>Weld type</small>	<small>Complete penetration</small>	<small>All</small>	
<b>Gás de Proteção:</b>	NA	NA	
<small>Gas</small>	<small>NA</small>	<small>NA</small>	
<b>Corrente / Polaridade:</b>	CC+	CC+	
<small>Current</small>	<small>DCRP</small>	<small>DCRP</small>	
<b>Tipo de Transferência:</b>	NA	NA	
<small>Transfer mode</small>	<small>NA</small>	<small>NA</small>	
<b>Metal de Adição</b>	<b>Especificação AWS</b>	A 5.23	AWS A 5.23
	<small>AWS specification</small>	<small>A 5.23</small>	<small>AWS A 5.23</small>
	<b>Classificação:</b>	F6A4/EA2	Todas da AWS A 5.23
	<small>Classification</small>	<small>F6A4/EA2</small>	<small>All AWS A 5.23</small>
	<b>Marca comercial:</b>	ESAB	NA
<small>Trademark</small>	<small>ESAB</small>	<small>NA</small>	
<b>F Number:</b>	NA	NA	
<small>F Number</small>	<small>NA</small>	<small>NA</small>	
<b>Diâmetros:</b>	3,97 mm	Ilimitado	
<small>Diameter</small>		<small>Unlimited</small>	
<b>Tipos de Ensaios</b>			
<b>Tipos de Ensaios</b>	Ensaio visual: Aprovado		
	( ) Raio X	CP: 01	Lauda: Aprovado
	( ) Raio gama		
	(x) Dobramento + Tração		
Laboratório: Fundação Universidade de Itaipua		Relatório Nº: 227319	
Certificado pela qualificação da EPS/RQPS 001/14			
Teste acompanhado e visual aprovado por Bruno de Ornellas Ferraz - SNQC IS5170N1			
participa apenas como agência Certificadora			
Engenharia		Fiscalização	
Data:		Data:	

 <b>ACC Inspeções Técnicas</b>			
<b>Certificado de Qualificação de Soldador - CQS</b> Welder Qualification Certificate - WQC			
<b>SAW - Submerged Arc Welding</b>		<b>CQS Nº:</b> 008/14	<b>Revisão:</b> 00
<b>Nome:</b> Rulmar Cardoso Pereira Júnior		<b>Sinete:</b> D8	<b>Data:</b> 12/05/2014
<b>Norma:</b> AWS D1.1 - 2010		<b>EPS (Rev.):</b> 002/14	<b>Identidade:</b> NA
Processo de Soldagem: SAW - Submerged Arc Welding - Dupla Fusão <small>Welding Process: SAW - Submerged Arc Welding (MAO) - Semi-automatic</small>			
<b>Variáveis</b>	<b>Condições do Teste</b>	<b>Faixa de Aplicação</b>	
<b>Processo:</b>	SAW - Dupla Fusão	SAW - Dupla Fusão	
<b>Posições:</b>	Chapa - 2F	2F / 1F	
<b>Progressão de Soldagem:</b>	NA	NA	
<b>Metal base:</b>	Usiminas Sincron-BHS-450M (ASTM A-572 Gr. 65)	Todos os listados AWS D1.1 2008, qualificados.	
<b>Espessura do metal base:</b>	12,7 mm x 25,4 mm	≥ 3,2 mm	
<b>Espessura do metal soldado:</b>	12,7 mm x 25,4 mm	NA	
<b>Diâmetro externo do tubo:</b>	Chapa - 2F	Ilimitado	
<b>Tipo de junta:</b>	Ângulo	Ângulo	
<b>Raiz abertura / face:</b>	NA	NA	
<b>Cobre-junta:</b>	NA	NA	
<b>Tipo de Solda:</b>	Solda em ângulo	Solda em ângulo	
<b>Ângulo da Junta</b>	45°	45° ± 10°	
<b>Corrente / Polaridade:</b>	CC+	CC+	
<b>Tipo de Transferência:</b>	NA	NA	
<b>Metal de Adição</b>	<b>Especificação AWS</b>	A 5.23	AWS A 5.23
	<b>Classificação:</b>	F8A4/EA2	Todas da AWS A 5.23
	<b>Marca comercial:</b>	ESAB	NA
	<b>F Number:</b>	NA	NA
	<b>Diâmetros:</b>	3,97 mm	Ilimitado
<b>Tipos de Ensaios</b>			
<b>Testes</b>	Ensaio visual: Aprovado		
	<input type="checkbox"/> Raio X <input type="checkbox"/> Raio gama <input checked="" type="checkbox"/> Macrografia + Fratura	CP: 02	Laudo: Aprovado
	Laboratório: Fundação Universidade de Itaipua		Relatórios Nº: 227320 / 227321 / 227322 / 227324 / 227325
Certificado pela qualificação da EPS/RQPS 002/14			
Teste semimanual e visual aprovado por Bruno de Ornellas Ferraz - SNQC IS5170N1			
participa apenas como agência Certificadora			
Engenharia		Fiscalização	
Data:		Data:	

 <b>ACC Inspeções Técnicas</b>		 <b>CODEME</b> CONSTRUÇÕES EM AÇO	
<b>Certificado de Qualificação de Soldador - CQS</b> <small>Welder Qualification Certificate - WQC</small>			
<b>SAW - Submerged Arc Welding</b>		<b>CQS Nº:</b> 009/14	<b>Revisão:</b> 00
<b>Nome:</b> Uilian de Araújo Cruz		<b>Sinete:</b> E5	<b>Data:</b> 12/05/2014
<b>Norma:</b> AWS D1.1 - 2010		<b>EPS (Rev.):</b> 002/14	<b>Identidade:</b> NA
<small>Welding Process: SAW - Submerged Arc Welding (MAAG) - Semi-automatic</small> <small>WPS (Rev.)</small>			
<b>Processo de Soldagem: SAW - Submerged Arc Welding - Dupla Fusão</b>			
<b>Variáveis</b>	<b>Condições do Teste</b>	<b>Faixa de Aplicação</b>	
<b>Processo:</b>	SAW - Dupla Fusão	SAW - Dupla Fusão	
<b>Posições:</b>	Chapa - 2F	2F / 1F	
<b>Progressão de Soldagem:</b>	NA	NA	
<b>Metal base:</b>	Usiminas Sincron-BHS-450M (ASTM A-572 Gr. 65)	Todos os listados AWS D1.1 2008, qualificados.	
<b>Espessura do metal base:</b>	12,7 mm x 25,4 mm	≥ 3,2 mm	
<b>Espessura do metal soldado:</b>	12,7 mm x 25,4 mm	NA	
<b>Diâmetro externo do tubo:</b>	Chapa - 2F	Ilimitado	
<b>Tipo de junta:</b>	Ângulo	Ângulo	
<b>Raiz abertura / face:</b>	NA	NA	
<b>Cobre-junta:</b>	NA	NA	
<b>Tipo de Solda:</b>	Solda em ângulo	Solda em ângulo	
<b>Ângulo da Junta</b>	45°	45° ± 10°	
<b>Corrente / Polaridade:</b>	CC+	CC+	
<b>Tipo de Transferência:</b>	NA	NA	
<b>Metal de Adição</b>	<b>Especificação AWS</b>	A 5.23	AWS A 5.23
	<b>Classificação:</b>	FBA4/EA2	Todas da AWS A 5.23
	<b>Marca comercial:</b>	ESAB	NA
	<b>F Number:</b>	NA	NA
	<b>Diâmetros:</b>	3,97 mm	Ilimitado
<b>Tipos de Ensaios</b>			
<b>Testes</b>	Ensaio visual: Aprovado		
	( ) Raio X	CP: 02	Laudo: Aprovado
	( ) Raio gama		
	Laboratório: Fundação Universidade de Itaipua		Relatórios Nº: 227320 / 227321 / 227322 / 227324 / 227325
Certificado pela qualificação da EPS/RQPS 002/14			
Teste acompanhado e visual aprovado por Bruno de Ornellas Ferraz - SNQC IS5170N1			
C participa apenas como agência Certificadora			
Engenharia		Fiscalização	
Data:		Data:	

 <b>ACC Inspeções Técnicas</b>		 <b>CODEME</b> CONSTRUÇÕES EM AÇO	
<b>Certificado de Qualificação de Soldador - CQS</b> Welder Qualification Certificate - WQC			
<b>FCAW - Flux Cored Arc Welding</b>		<b>CQS Nº:</b> 010/14	<b>Revisão:</b> 00
<b>Nome:</b> Leonardo Medeiros		<b>Sinete:</b> C3	<b>Data:</b> 12/05/2014
<b>Norma:</b> AWS D1.1 - 2010		<b>EPS (Rev.):</b> 003/14	<b>Identidade:</b> NA
<b>Processo de Soldagem:</b> FCAW - Flux Cored Arc Welding			
<b>Variáveis</b>	<b>Condições do Teste</b>		<b>Faixa de Aplicação</b>
<b>Processo:</b>	FCAW		FCAW
<b>Posições:</b>	Chapa - 1G		1G / 1F / 2F
<b>Progressão de Soldagem:</b>	NA		NA
<b>Metal base:</b>	Usiminas Sincron-BHS-450M (ASTM A-572 Gr. 65)		Todos os listados AWS D1.1 2010, e qualificados.
<b>Espessura do metal base:</b>	25,4 mm		de 3,2 a ilimitado
<b>Espessura do metal soldado:</b>	25,4 mm		NA
<b>Diâmetro externo do tubo:</b>	Chapa - 1G		≥ 610,0 mm
<b>Tipo de junta:</b>	Topo		Todas
<b>Raiz abertura / face:</b>	3,0 mm		Todas
<b>Cobre-junta:</b>	Sim		Com cobre-junta ou extração de raiz
<b>Tipo de Solda:</b>	Penetração total		Todas
<b>Gás de Proteção:</b>	99,99% CO <sub>2</sub>		Ilimitado
<b>Corrente / Polaridade:</b>	CC+		CC+
<b>Tipo de Transferência:</b>	NA		NA
<b>Metal de Adição</b>	<b>Especificação AWS</b>	A 5.20	SFA A 5.20
	<b>Classificação:</b>	E 71T-1C	Todas da SFA A 5.20
	<b>Marca comercial:</b>	ESAB	NA
	<b>F Number:</b>	NA	NA
	<b>Diâmetros:</b>	1,2 mm	Ilimitado
<b>Tipos de Ensaios</b>			
<b>Testes</b>	Ensaio visual: Aprovado		Laudo: Aprovado
	<input type="checkbox"/> Raio X <input type="checkbox"/> Raio gama <input checked="" type="checkbox"/> Dobramento + Tração		
	Laboratório: Fundação Universidade de Itaipua		
Certificado pela qualificação da EPS/RQPS 003/14			
Teste acompanhado e visual aprovado por Bruno de Omellas Ferraz - SNQC IS5170N1			
? participa apenas como agência Certificadora			
Codeme		Fiscalização	
Data:		Data:	



 <b>ACC Inspeções Técnicas</b>		 <b>CODEME</b> CONSTRUÇÕES EM AÇO	
<b>Certificado de Qualificação de Soldador - CQS</b> <small>Welder Qualification Certificate - WQC</small>			
<b>FCAW - Flux Cored Arc Welding</b>		<b>CQS Nº:</b> 011/14	<b>Revisão:</b> 00
<b>Nome:</b> Thiago Gerônimo do Nascimento		<b>Sinete:</b> E2	<b>Data:</b> 12/05/2014
<b>Norma:</b> AWS D1.1 - 2010		<b>EPS (Rev.):</b> 004/14	<b>Identidade:</b> NA
<b>Processo de Soldagem:</b> FCAW - Flux Cored Arc Welding			
<b>Variáveis</b>	<b>Condições do Teste</b>	<b>Faixa de Aplicação</b>	
<b>Processo:</b>	FCAW	FCAW	
<b>Posições:</b>	Chapa - 2G	2G / 1G / 1F / 2F	
<b>Progressão de Soldagem:</b>	NA	NA	
<b>Metal base:</b>	Usiminas Sincron-BHS-450M (ASTM A-572 Gr. 65)	Todos os listados AWS D1.1 2010, e qualificados.	
<b>Espessura do metal base:</b>	25,4 mm	de 3,2 a ilimitado	
<b>Espessura do metal soldado:</b>	25,4 mm	NA	
<b>Diâmetro externo do tubo:</b>	Chapa - 2G	≥ 610,0 mm	
<b>Tipo de junta:</b>	Topo	Todas	
<b>Raiz abertura / face:</b>	3,0 mm	Todas	
<b>Cobre-junta:</b>	Sim	Com cobre-junta ou extração de raiz	
<b>Tipo de Solda:</b>	Penetração total	Todas	
<b>Gás de Proteção:</b>	99,99% CO <sub>2</sub>	Ilimitado	
<b>Corrente / Polaridade:</b>	CC+	CC+	
<b>Tipo de Transferência:</b>	NA	NA	
<b>Metal de Adição</b>	<b>Especificação AWS</b>	A 5.20	SFA A 5.20
	<b>Classificação:</b>	E 71T-1C	Todas da SFA A 5.20
	<b>Marca comercial:</b>	ESAB	NA
	<b>F Number:</b>	NA	NA
	<b>Diâmetros:</b>	1,2 mm	Ilimitado
<b>Tipos de Ensaios</b>			
<b>Testes</b>	Ensaio visual: Aprovado		
	<input type="checkbox"/> Raio X <input type="checkbox"/> Raio gama <input checked="" type="checkbox"/> Dobramento + Tração		CP: 04
	Laboratório: Fundação Universidade de Itaipua		Laudo: Aprovado
Relatório Nº: 227334			
Certificado pela qualificação da EPS/RQPS 004/14			
Teste acompanhado e visual aprovado por Bruno de Ornellas Ferraz - SNQC IS5170N1			
O participa apenas como agência Certificadora			
Codeme		Fiscalização	
Data:		Data:	