

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO
GRANDE DO SUL - *CAMPUS* ERECHIM
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECÂNICA

Jean Lucas Pierozan

**ANÁLISE DOS EFEITOS DO PROCESSO DE DESEMPENO POR CHAMA EM
UMA VIGA SOLDADA TIPO “I” DE AÇO ESTRUTURAL NBR 5008**

Erechim

2023

Jean Lucas Pierozan

**ANÁLISE DOS EFEITOS DO PROCESSO DE DESEMPENO POR CHAMA EM
UMA VIGA SOLDADA TIPO “I” DE AÇO ESTRUTURAL NBR 5008**

Trabalho Conclusão de Curso realizado no *Campus* Erechim do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Dr. Fábio Luis Knewitz.

Erechim

2023

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meus pais e irmãos, por serem firme apoio em meus dias de fraqueza e por se apresentarem pacientes e solícitos, acreditando no cumprimento do meu objetivo. Sem vocês certamente não teria chegado até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela direção, refúgio e sustento.

Ao professor Fábio Luis Knewitz pela confiança depositada em meu trabalho, por prestar orientação desde a concepção da proposta até o momento da entrega, disponibilizando seu tempo para acompanhar e orientar os experimentos e ensaios realizados em laboratório.

As amizades que fiz durante minha estadia no campus, em especial meus amigos Gustavo Pohlig, Lisiane Mayeski, Augusto Corrêa e Andressa Lorenzoni. Obrigado pelos bons momentos compartilhados e assistência prestada, os guardo comigo.

A equipe de assistência estudantil pelos serviços prestados, pela orientação e conhecimentos compartilhados durante a execução do projeto de extensão a qual fiz parte, vosso trabalho foi de vital importância para minha permanência e conclusão deste curso.

Aos demais professores do curso de engenharia mecânica do IFRS *campus* Erechim, pelos ensinamentos e instruções.

E, por fim, agradeço à empresa Medabil SA por possibilitar o estudo do processo produtivo interno e pelo fornecimento de material para realização dos experimentos e ensaios. Sem estes o trabalho não teria sido feito.

“Um pouco de ciência nos afasta de Deus.
Muita, nos aproxima”

(Louis Pasteur)

RESUMO

O aço patinável é um material amplamente utilizado na construção civil para fabricação de estruturas metálicas robustas como pontes e viadutos. Este trabalho tem por objetivo o estudo dos processos de soldagem para fabricação de componentes estruturais, os efeitos indesejáveis originados neste processo assim como as técnicas de correção utilizadas para mitigar tais efeitos, com ênfase no processo de desempenho por chama. Visando analisar os efeitos do desempenho por chama em componentes estruturais, foram realizados neste trabalho ciclos térmicos de simulação de desempenho em uma seção de viga "I" de aço estrutural NBR 5008. Sensores de temperatura foram instalados na viga para levantamento e análise das curvas de aquecimento e resfriamento do material, em seguida foram realizados perfis de dureza para avaliar o efeito do tratamento térmico sobre o componente além de ensaios metalográficos nos pontos de interesse com o objetivo de investigar possíveis alterações microestruturais. Através da análise dos dados obtidos, foi possível constatar que a utilização de parâmetros de temperatura superiores a regulamentada para operação do processo de desempenho por chama pode ocasionar em alterações indesejáveis nas propriedades mecânicas de componentes estruturais.

Palavras chave: Patinável; Desempeno; Distorção.

ABSTRACT

Weathering steel is a widely used material in civil construction for manufacturing robust metal structures such as bridges and viaducts. This work aims to study welding processes for the production of structural components, the undesirable effects arising from this process, as well as correction techniques used to mitigate such effects, with emphasis on the flame straightening process. In order to analyze the effects of flame straightening on structural components, thermal simulation cycles were conducted in this study on a section of "I" beam made of structural steel according to NBR 5008 standards. Thermocouples sensors were installed in the beam to collect and analyze the heating and cooling curves of the material. Subsequently, hardness profiles were obtained to assess the effect of the heat treatment on the component, along with metallographic tests were performed at points of interest with the aim of investigating possible microstructural changes. Through the analysis of the obtained data, it was observed that the use of temperature parameters higher than those regulated for the flame straightening process may lead to undesirable alterations in the mechanical properties of structural components.

Keywords: Weathering; Straightening; Distortion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ponte de Coalbrookdale.....	18
Figura 2 – Fotografias mostrando etapas da obra de construção da Torre Eiffel ao longo do tempo: Em (a) obra em julho de 1887, em (b) obra em dezembro de 1887, em (c) obra em maio de 1888, em (d) obra em agosto de 1888, em (e) obra em dezembro de 1888 e em (f) obra concluída em março de 1889.	19
Figura 3 – Evolução nos processos siderúrgicos e tecnologias das ligações	21
Figura 4 – Análise comparativa de perda de massa ao longo do tempo entre um aço patinável e um aço carbono em diferentes atmosferas. Em (a) atmosfera industrial de Cubatão – SP, em (b) atmosfera marinha de Bertioga – SP, em (c) atmosfera urbana de Santo André – SP e em (d) atmosfera rural de Itararé – SP.	25
Figura 5 – Evolução da cor da pátina de acordo com o período de exposição: Em (a) período de sete dias, em (b) período de quatorze, em (c) período de cinquenta dias e em (d) período de noventa dias.....	26
Figura 6 – Em (a) The Delay Plaza, e em (b) Chicago Picasso.	27
Figura 7 – Em (a) Burro Creek Bridge sobre o cânion e em (b) processo de montagem da estrutura da ponte.	28
Figura 8 – Perfil I soldado: Abreviaturas.....	31
Figura 9 – Composição de um perfil I em aço patinável por meio de solda a arco submerso.....	32
Figura 10 – Tipos de deformação decorrentes da soldagem: Em (a) contração transversal, em (b) contração longitudinal, em (c) contração rotacional, em (d) distorção angular, em (e) flambagem e em (f) flexão longitudinal.	33
Figura 11 – Em (a) chanfro preparado em “V” e em (b) chanfro preparado em “U”. .	35
Figura 12 – Sequência de processo do método de seccionamento.	37
Figura 13 – Distribuição de tensões residuais em uma viga tipo “I” soldada de aço ASTM A36 com chapas cortadas por meio de processo térmico.	38
Figura 14 – Técnicas de sequência de soldagem, em (a) soldagem intercalada e em (b) soldagem com passe a ré.	39

Figura 15 – Correção de distorção em um perfil “T” pelo método de prensamento: Em (a) peça deformada, em (b) prensamento e em (c) peça com deformação corrigida.	40
Figura 16 – Aquecimento de peça pelo método térmico de indução.....	41
Figura 17 – Princípio do processo de Desempeno por Chama.	42
Figura 18 – Em (a) sentido da distorção angular em juntas soldadas de filete “T” e em (b) sentido do desempenho realizado em juntas soldadas de filete “T”.	44
Figura 19 – Desempeno manual por chama para correção de distorção angular em uma viga “I” estrutural.....	45
Figura 20 – Processo de desempenho para distorções de paralelismo em componentes estruturais.....	45
Figura 21 – Desempeno manual por chama para correção de distorção de paralelismo em uma viga “I” estrutural.....	46
Figura 22 – Em (a) esquema de aquecimento da peça e em (b) componente após realização do processo de desempenho.	47
Figura 23 – Seções de viga “I” adotadas como objeto de estudo.....	48
Figura 24 – Dimensões da seção transversal do perfil de estudo.	49
Figura 25 – Configuração de instalação dos sensores na viga.	50
Figura 26 – Configuração da furação na viga para alocação dos sensores.	51
Figura 27 – Sistema de aquisição de dados multicanais Fieldlogger.	51
Figura 28 – Configurações de chama de acordo com a proporção de mistura dos gases constituintes.	52
Figura 29 – Posicionamento da tocha em relação a viga.	53
Figura 30 – Ciclo térmico em execução.	54
Figura 31 – Amostra retirada do componente para realização do ensaio de dureza.....	56
Figura 32 – Definição da posição dos perfis de dureza analisados.....	57
Figura 33 – Gráfico da variação de temperatura em função do tempo para aquecimento e resfriamento da amostra da simulação 01.	59
Figura 34 – Gráfico da variação de temperatura em função do tempo para aquecimento e resfriamento da amostra da simulação 02.	62
Figura 35 – Valores de dureza dos perfis em relação a distância do centro da amostra de material base.....	66

Figura 36 – Distribuição dos valores de dureza ao longo do intervalo de medição da amostra do material base.....	67
Figura 37 – Valores de dureza dos perfis em relação a distância do centro da amostra da simulação 01.	68
Figura 38 – Distribuição dos valores de dureza ao longo do intervalo de medição da amostra do material da simulação 01.....	69
Figura 39 – Valores de dureza dos perfis em relação a distância do centro da amostra da simulação 02.	70
Figura 40 – Distribuição dos valores de dureza ao longo do intervalo de medição da amostra do material da simulação 02.....	71
Figura 41 – Metalografia da microestrutura do material base.	73
Figura 42 – Macrografia do material da simulação 01.....	74
Figura 43 – Metalografia da microestrutura do material da simulação 01: Região próxima ao centro.....	75
Figura 44 – Metalografia da microestrutura do material da simulação 01: Região intermediária.....	76
Figura 45 – Metalografia da microestrutura do material da simulação 01: Região externa.	77
Figura 46 – Macrografia do material da simulação 02.....	78
Figura 47 – Metalografia da microestrutura do material da simulação 02: Região central.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química de panela	23
Tabela 2 – Limites de escoamento e ruptura	23
Tabela 3 – Composição química do Aço WS 350 conforme certificado de qualidade do material.....	50

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Corrosividade dos ambientes para o aço carbono de acordo com a ISO 12944-2	24
Quadro 2 – Taxas de aquecimento e resfriamento das simulações 01 e 02	65

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 OBJETIVOS.....	16
2.1 OBJETIVO GERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1 AÇOS PATINÁVEIS	17
3.1.1 EVOLUÇÃO DOS PROCESSOS SIDERÚRGICOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL	17
3.1.2 PROPRIEDADES GERAIS DOS AÇOS PATINÁVEIS	22
3.1.3 UTILIZAÇÃO DO AÇO PATINÁVEL NA CONSTRUÇÃO CIVIL	27
3.2 FABRICAÇÃO DE COMPONENTES ESTRUTURAIS.....	29
3.2.1 SOLDAGEM DE COMPOSIÇÃO DE PERFIS METÁLICOS ESTRUTURAIS.....	29
3.2.2 TENSÕES RESIDUAIS E DISTORÇÕES EM COMPONENTES ESTRUTURAIS DECORRENTES DO PROCESSO DE SOLDAGEM	32
3.2.3 DESEMPENO POR CHAMA EM COMPONENTES ESTRUTURAIS SOLDADOS	39
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	58
5.1 CURVAS DE AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO	58
5.2 PERFIS DE DUREZA	65
5.3 ENSAIOS DE METALOGRAFIA	72
6 CONCLUSÕES.....	80
7 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	83
REFERÊNCIAS.....	84
APÊNDICE A – CONFIGURAÇÃO DA FURAÇÃO PARA INSTALAÇÃO DOS TERMOPARES.....	89
APÊNDICE B – RESULTADOS DOS PERFIS DE DUREZA OBTIDOS NOS ENSAIOS	90

1 INTRODUÇÃO

A indústria brasileira de fabricação de sistemas construtivos em estruturas metálicas apresentou um crescimento expressivo nas últimas décadas. De acordo com a pesquisa intitulada “Cenário dos fabricantes de Estruturas de Aço 2022” realizada pelo Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA) juntamente com a Associação Brasileira da Construção Metálica (ABCM), publicada no ano de 2022, o faturamento das empresas fabricantes de estruturas metálicas no ano de 2021 foi mais de três vezes maior em relação aos quatro anos anteriores. De acordo com o Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES) a alta repentina da indústria nacional de fabricação de estruturas metálicas ocorreu na década de 2000, onde o consumo de aço destinado a fabricação de estruturas metálicas passou de 324 mil toneladas em 2002 para 1,6 milhão de toneladas em 2009.

A utilização de estruturas metálicas em sistemas construtivos apresenta vantagens e desvantagens em relação a utilização de estruturas em concreto armado, de modo que para determinar a correta aplicação se faz necessária a análise do atendimento dos parâmetros determinados em projeto com relação aos requisitos de arquitetura e engenharia. A decisão pelo emprego de estruturas metálicas ao invés de estruturas em concreto armado, traz por principal vantagem a redução do peso específico do componente estrutural capaz de atender à mesma solicitação de carga, possibilitando deste modo a redução do custo de fundação uma vez que o peso total do sistema é menor.

Outro aspecto relevante na análise comparativa entre diferentes sistemas construtivos é a vida útil da estrutura. Segundo Helene (1993) os principais fenômenos responsáveis por patologias nas estruturas são: agentes atmosféricos e biológicos, variações de temperatura e umidade, incompatibilidade de materiais e cargas excessivas. No emprego de estruturas metálicas há uma grande preocupação em relação a agentes patológicos causadores da deterioração estrutural por meio da corrosão. Motivada por essa necessidade a fabricante americana U.S. Steel desenvolveu em 1932 o aço COR-TEN, um material de alta resistência mecânica (> 35 kgf/mm²) que apresentava resistência a corrosão superior aos materiais utilizados na construção civil na época.

Mediante a constatação da eficácia do uso deste material com relação a resistência a corrosão atmosférica, a indústria metalúrgica americana passou a desenvolver materiais similares estudando os efeitos da adição de elementos de liga à composição. Atualmente os materiais que apresentam tais propriedades compõem a família dos aços patináveis e são regulamentados por normas nacionais e internacionais quanto aos limites da composição química e as propriedades mecânicas às quais devem apresentar. Os aços patináveis são, portanto, aços de baixa liga e alta resistência mecânica, dotados de elevada resistência a corrosão atmosférica em relação a aços estruturais comuns.

O termo “Patinável” foi atribuído a este material devido ao processo químico corrosivo característico originado por meio dos elementos de liga específicos adicionados a composição. O processo corrosivo ocorre inicialmente formando uma camada de ferrugem – denominada pátina – bastante aderente ao material, que é capaz de dificultar a ação de agentes corrosivos sobre a superfície do aço.

Os elementos estruturais fabricados utilizando aços patináveis são, na maioria dos casos, compostos por meio de ligações soldadas, devido principalmente a versatilidade do processo de soldagem para obtenção do produto desejado. Este processo se caracteriza pela geração de um campo de aquecimento não homogêneo que resulta em distorções dimensionais originadas por tensões térmicas produzidas durante o resfriamento do cordão de solda. Quando as distorções geradas no processo excedem a tolerância adotada em projeto torna-se necessário a correção, de modo a garantir o atendimento às especificações dimensionais do componente estrutural em questão. Um método amplamente utilizado para correção de tais distorções em estruturas metálicas é o desempenho por chama, que consiste no aporte de calor em pontos específicos estratégicos por meio da combustão de gases através de dispositivos de ignição de chama. Embora eficiente na correção de distorções dimensionais, por se tratar de um método térmico de adição de calor, o desempenho por chama desperta uma preocupação no que diz respeito a possível alteração das propriedades do material após a realização do procedimento.

Visto que os tratamentos térmicos são capazes de gerar significativas alterações nas propriedades dos materiais, se faz necessária a análise do material após sua exposição a tratamentos dessa natureza com a finalidade de se certificar

acerca do atendimento aos requisitos determinados em projeto. Motivado por essa premissa, este trabalho tem por propósito analisar os efeitos do processo térmico de desempenho por chama em estruturas metálicas de aço patinável, investigando a alteração das propriedades do material por meio da realização de ensaios e testes em laboratório.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar os efeitos do processo de desempenho por chama nas propriedades mecânicas de aços estruturais patináveis, adotando por objeto de estudo uma viga soldada tipo “I” de aço estrutural NBR 5008.

2.2 Objetivos Específicos

- a) Realizar uma simulação física dos ciclos térmicos de desempenho realizados na indústria, para levantar as curvas de aquecimento e resfriamento do material;
- b) Analisar o perfil de dureza do perfil tratado para avaliar o efeito do tratamento sobre as propriedades mecânicas do aço;
- c) Analisar a microestrutura do material após o processo de desempenho através de ensaio metalográfico, com o objetivo de detectar alterações em relação a microestrutura original do material.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta sessão do trabalho será realizada uma revisão bibliográfica com a proposta de estudar o fenômeno de distorção geométrica, decorrente do processo de soldagem por arco elétrico, em perfis estruturais fabricados de aço patinável assim como o estudo do método de correção de distorção por chama, comumente aplicado a perfis acometidos por distorções desta natureza.

De forma introdutória propõe-se apresentar um panorama da origem e história da utilização do aço patinável na construção civil, as propriedades gerais desta classe de aços e suas principais aplicações em sistemas construtivos. Anterior ao tema principal, propõe-se expor brevemente o processo de fabricação de perfis estruturais por soldagem a arco elétrico.

3.1 Aços Patináveis

Nesta sessão será apresentado um estudo sobre a evolução da siderurgia em relação ao uso de estruturas metálicas na construção civil, em sequência serão apresentadas as propriedades gerais dos aços patináveis e por fim abordar-se-á o emprego dos aços patináveis em sistemas construtivos.

3.1.1 Evolução dos processos siderúrgicos na construção civil

A história da humanidade é marcada por grandes avanços tecnológicos alcançados através da descoberta e desenvolvimento de novos materiais. Ao longo das eras históricas alguns períodos foram nomeados de acordo com os materiais descobertos pelo homem, como por exemplo a idade da pedra, do cobre e do ferro. Nos tempos primordiais a motivação para a construção de abrigos e habitações vinha da necessidade de segurança contra ataques animais e intempéries climáticas, sendo utilizados para essa finalidade materiais encontrados no ambiente como a madeira e restos vegetais (NAVARRO, 2006).

Ao longo dos anos as edificações tornaram-se mais sofisticadas e novos materiais foram nelas empregados com o objetivo de garantir a integridade e o

aumento da resistência dos componentes estruturais. Na Idade Média a utilização de materiais como madeira e a pedra trabalhada possibilitaram a construção de grandes estruturas como castelos, muralhas e templos, enquanto a utilização do ferro e suas ligas limitava-se a confecção de ferramentas, armamentos e utensílios. Importantes novidades na produção industrial surgiram durante a Revolução Industrial ocorrida no Século XVIII, como a metalurgia do coque, a utilização da máquina a vapor na mineração e o processo de laminação, tecnologias estas responsáveis pelo início da utilização do aço na construção civil (NAVARRO, 2006).

As primeiras construções realizadas através de estruturas metálicas foram pontes de ferro fundido, como a famosa Ponte de Coalbrookdale (Figura 1) construída no ano de 1779 na Inglaterra, que carrega o título de “Primeira ponte de ferro do mundo”. O ferro fundido foi empregado na fabricação de estruturas por apresentar boa resistência a esforços de compressão, porém quando este material é submetido a esforços de tração seu comportamento não é de igual modo satisfatório. A baixa resistência do ferro fundido a esforços trativos ocasionou na limitação da geometria dos componentes estruturais fabricados por meio dele assim como o arranjo destes componentes no conjunto do sistema estrutural (PERNETA *et al.*, 2010).

Figura 1 – Ponte de Coalbrookdale.

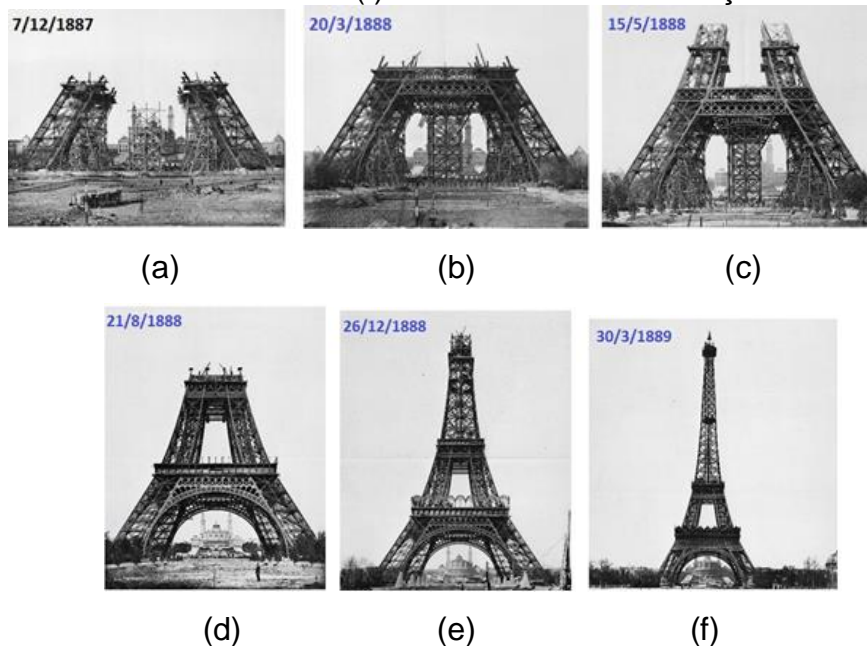


Fonte: PERNETA *et al.* (2010)

Em 1784, Henry Cort apresenta à indústria metalúrgica um novo material: O ferro pudlado. O método primordial de obtenção deste material consistia na descarbonetação do ferro fundido (Que ainda era o principal material utilizado na construção de estruturas metálicas na época) em um forno revérbero, sendo em seguida submetido ao processo de forjamento (OLIVEIRA, 2021). O ferro pudlado possui, em regra, menor teor de carbono e maior ductibilidade em relação ao ferro fundido, o que o torna um material superior em relação as propriedades desejáveis em componentes estruturais (CREMONA *et al.*, 2007).

O mercado da construção civil foi beneficiado com a utilização do ferro pudlado, uma vez que seu processo de fabricação possibilitava alto volume de produção com custo viável, sendo o primeiro material a ser utilizado em larga escala na fabricação de estruturas metálicas. A alta produção do ferro pudlado possibilitou a construção de muitos edifícios e pontes na Europa, mas sem dúvidas a estrutura mais célebre produzida inteiramente deste material foi a torre Eiffel (Figura 2) construída em Paris, na França no ano de 1889 (BUCHWALD, 2008 *apud* OLIVEIRA, 2021, p. 27).

Figura 2 – Fotografias mostrando etapas da obra de construção da Torre Eiffel ao longo do tempo. Em (a) obra em julho de 1887, em (b) obra em dezembro de 1887, em (c) obra em maio de 1888, em (d) obra em agosto de 1888, em (e) obra em dezembro de 1888 e em (f) obra concluída em março de 1889.



Fonte: HISTÓRIA (2023)

No ano de 1855 um processo siderúrgico desenvolvido por Henry Bessemer revolucionou a indústria, tornando possível a produção em larga escala de um material até então pouco utilizado em fins estruturais: o Aço. O aço obtido por meio do processo de Bessemer apresentava qualidade superior a um custo consideravelmente menor quando comparado a aços obtidos por meio dos processos existentes na época (PERNETA *et al.*, 2010). O aço passa a ser o material dominante na construção civil, possibilitando a construção de edifícios multiandares de forma mais rápida e com menor custo em comparação aos edifícios tradicionais da época, que em sua maioria eram feitos de madeira e blocos cerâmicos (FORESTELL *et al.*, 2021).

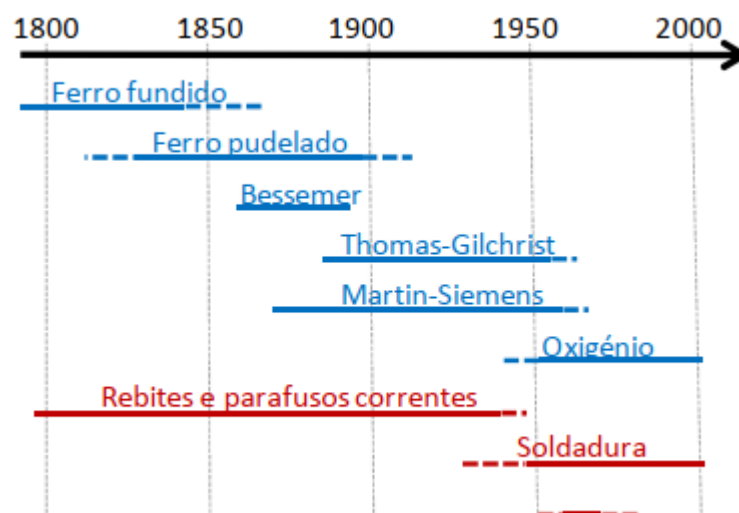
O processo de Bessemer obteve tamanho êxito que foi responsável pela fundação da era do aço, dando início a segunda revolução industrial. Embora revolucionário, o procedimento apresentou limitações no que dizia respeito aos elementos indesejáveis, como o fósforo e o nitrogênio presentes na composição final do aço produzido. Com relação ao fósforo, o processo limitava-se a utilização de minério com baixo teor da substância que por sua vez era mais escasso. Em 1879 na Inglaterra, Sidney Gilchrist Thomas propôs uma melhoria ao processo de Bessemer que possibilitou a utilização de minério com alto teor de fósforo obtendo um produto final com quantidades aceitáveis do elemento em sua composição, porém o alto teor de nitrogênio ainda era um fator desfavorável em ambas as técnicas (GHOSH; CHATTERJEE, 2008).

Na década de 1860 um novo processo siderúrgico desenvolvido por Karl Wilhelm Siemens e os irmãos Martin mostrou-se capaz de produzir um aço de qualidade ainda superior ao obtido através dos processos de Bessemer e Thomas. O produto siderúrgico do processo Siemens-Martin apresentava melhores propriedades mecânicas e menor concentração de impurezas e elementos indesejáveis, possibilitando a utilização do minério de ferro com alto teor de fósforo, muito mais abundante na natureza que o minério utilizado no processo de Bessemer (GHOSH; CHATTERJEE, 2008).

Os processos de Bessemer, Thomas e Siemens-Martin tinham em comum o fato de serem incapazes de produzir aço com baixo teor de nitrogênio devido a alta concentração do elemento no ar utilizado no processo. Em 1950 a companhia Linde Division desenvolveu um novo método de extração do oxigênio do ar a um custo

viável, possibilitando a utilização do oxigênio puro ao invés do ar, este método foi intitulado “LD” em referência as iniciais da companhia. A primeira planta siderúrgica projetada tendo em vista a utilização do método LD foi construída na Áustria no ano de 1952, e posteriormente, devido a constatação de sua eficácia e alta produção, o processo foi amplamente empregado em plantas siderúrgicas ao redor do mundo. Fornos elétricos passaram a ser utilizados na indústria siderúrgica no ano de 1877, inicialmente na Itália e através deles foi possível obter aços de alta qualidade e aços liga (GHOSH; CHATTERJEE, 2008).

Figura 3 – Evolução nos processos siderúrgicos e tecnologias das ligações



Fonte: PERNETA *et al* (2010)

Na década de 1960 o constante esforço em prol do aprimoramento dos processos de obtenção do aço em busca de um produto com melhores propriedades culminou no desenvolvimento de um tipo de aço liga designado “aço de alta resistência e desempenho” (*High Performance Steel*, HPS), que apresentava excelente tenacidade e ductilidade além de elevada resistência a corrosão, possibilitando projetos estruturais inovadores (PERNETA *et al.*, 2010).

Na década de 1930 a companhia United States Steel Corporation desenvolveu um material designado Cor-Ten (*Corrosion Resistance and Tensile Strength*) que apresentava boa resistência a corrosão atmosférica devido a adição de elementos de liga como o cobre e o fósforo. O aço Cor-Ten foi inicialmente

desenvolvido para a indústria ferroviária, pois por meio dele foi possível construir vagões mais leves, contudo o comportamento deste material quanto sua resistência a corrosão ao longo dos anos foi notável a ponto de ser posteriormente aprimorado visando potencializar esta propriedade (PANONNI, 2004).

3.1.2 Propriedades gerais dos aços patináveis

Os aços patináveis ou aços aclimáveis são aços de baixa liga e alta resistência (*High-strength low-alloy*, HSLA) que apresentam excelente resistência a corrosão atmosférica. Os elementos de liga presentes no aço podem ter sido adicionados a liga com o objetivo de conferir propriedades mecânicas específicas ao material, assim como podem ser parte integrante do minério utilizado no processo (PANNONI, 2004). A pátina consiste em uma camada de óxido densa e aderente responsável pelo retardamento da progressão da corrosão, sendo gerada a partir da ação do intemperismo, envolvendo ciclos de molhamento e secagem do material (JÚNIOR, 2021).

Os elementos de liga adicionados ao aço responsáveis pela formação da pátina são o cobre, cromo, níquel, silício e o fósforo. O cobre quando acrescentado a liga em até 0,15% da composição global concede um aumento significativo da resistência do material a corrosão atmosférica. Os demais elementos agem em associação ao cobre potencializando a resistência a corrosão e concedendo diminuição da perda de espessura do material ao longo do tempo (JÚNIOR, 2021). A Associação Brasileira de Normas Técnicas regulamenta a composição química (Tabela 1) de chapas e bobinas de aço de baixa liga e alta resistência, resistentes a corrosão atmosférica de acordo com o grau de resistência a corrosão (ABNT, 2015).

Tabela 1 – Composição química de panela.

Elemento	GRC 300	GRC 350 / GRC 350 A	GRC 350 P
Carbono, máx.	0,20	0,25	0,20
Manganês, máx.	1,50	1,5	1,50
Silício	0,10 a 1,50	0,10 a 1,50	0,10 a 0,64
Fósforo, máx.	0,040	0,040	0,12
Enxofre, máx.	0,030	0,030	0,035
Cobre	0,05 a 0,55	0,05 a 0,55	0,20 a 0,51
Cromo, máx.	1,25	1,25	1,30
Níquel, máx.	0,65	0,65	1,10
[Nb+V+Ti]	-	≤ 0,15%	≤ 0,15%
Alumínio, mín.	0,015	0,015	0,015

Fonte: (ABNT, 2015)

A ABNT (2015) estabelece requisitos de propriedades mecânicas que devem ser atendidos na fabricação de bobina e chapas grossas de aço de baixa liga e alta resistência, resistentes a corrosão atmosférica. Por se tratarem de materiais desenvolvidos para aplicações estruturais, os limites de escoamento e ruptura (Tabela 2) destes materiais são relativamente altos quando comparados a bobinas e chapas grossas de uso geral, que segundo ABNT (2016) devem atender ao limite de resistência mínimo de 290 MPa.

Tabela 2 – Limites de escoamento e ruptura.

Propriedades mecânicas	GRC 300	GRC 350	GRC 350 A	GRC 350 P
L.E. mínimo, MPa	300	350	350	350
L.R. mínimo, MPa	400	490	490	500
L.R./L.E., mín.	1,18	1,18	1,18	1,18

Fonte: Adaptado de ABNT (2015)

Outra característica importante nos aços patináveis é a sua resistência a corrosão atmosférica, por definição como afirmado por Gentil (1996, p. 1): "Num aspecto muito difundido e aceito universalmente pode-se definir corrosão como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos". Gentil (1996) declara que a agressividade da corrosão (Quadro 1) que o material é submetido está diretamente ligada aos meios corrosivos aos quais está exposto: a atmosfera, a umidade relativa

e substâncias poluentes como particulados e gases vinculados a temperatura e as variações cíclicas de temperatura e umidade.

Quadro 1 – Corrosividade dos ambientes para o aço carbono de acordo com a ISO 12944-2.

Categoria de agressividade	Perda de massa e espessura para aço baixo carbono, após 365 dias de exposição		Exemplos de ambientes típicos (informativo)	
	Perda de massa (g/m ²)	Perda de espessura (µm)	Exterior	Interior
C1 (muito baixa)	≤10	≤1,3	—	Edificações condicionadas para o conforto humano (residências, escritórios, lojas, escolas, hotéis).
C2 (baixa)	> 10 a 200	> 1,3 a 25	Atmosferas com baixo nível de poluição. A maior parte das áreas rurais.	Edificações onde a condensação é possível, como armazéns e ginásios cobertos.
C3 (média)	> 200 a 400	> 25 a 50	Atmosferas urbanas e industriais com poluição moderada por SO ₂ . Áreas costeiras de baixa salinidade.	Ambientes industriais com alta umidade e alguma poluição atmosférica, como lavanderias, fábricas de alimentos, laticínios, cervejarias, etc.
C4 (alta)	> 400 a 650	> 50 a 80	Áreas industriais e costeiras de salinidade moderada.	Ambientes como indústrias químicas e coberturas de piscinas.
C5-I (muito alta, industrial)	> 650 a 1.500	> 80 a 200	Áreas industriais com alta umidade e atmosfera agressiva.	Edificações ou áreas com condensação quase que permanente e com alta poluição.
C5-M (muito alta, marinha)	> 650 a 1.500	> 80 a 200	Áreas costeiras com alta umidade e atmosfera agressiva.	

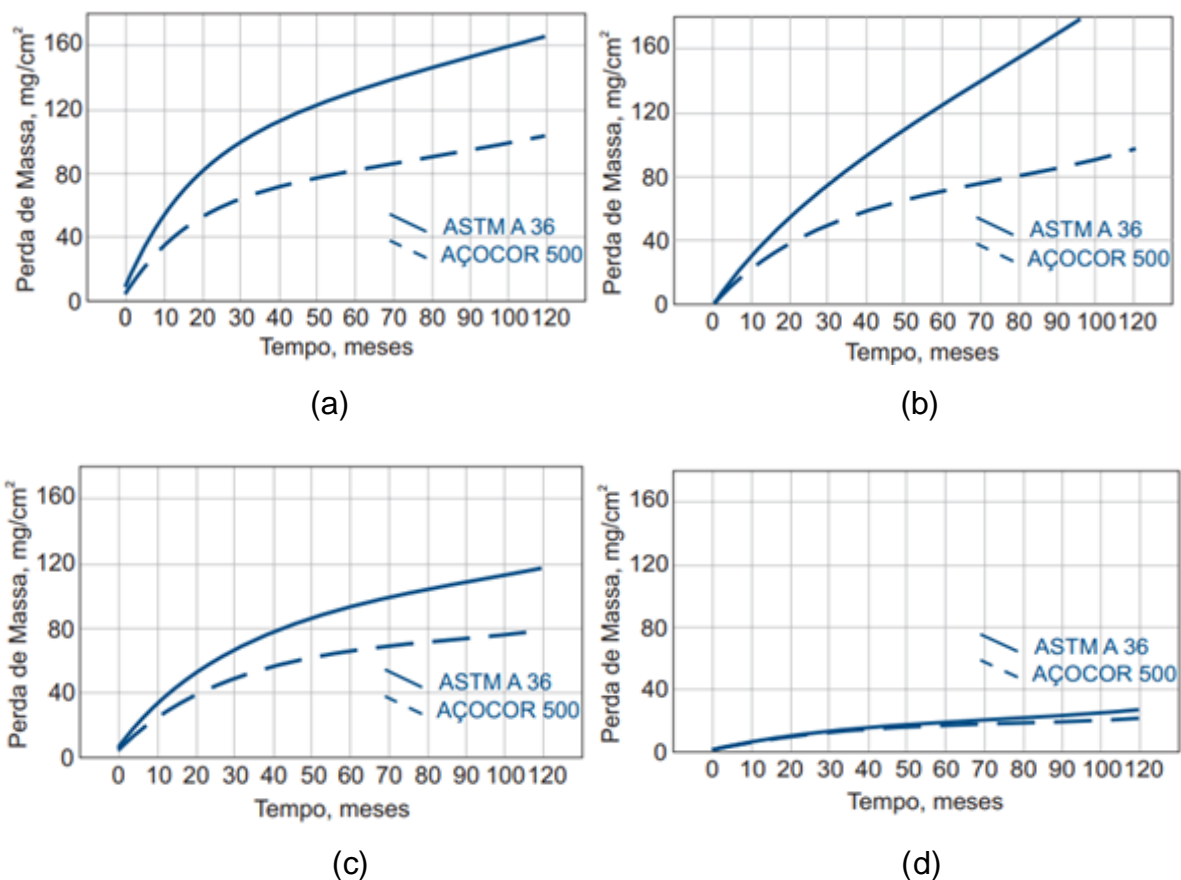
Fonte: Pannoni (2015)

Conforme afirma Panonni (2011), a utilização de aços patináveis não é recomendada para ambientes altamente corrosivos (categoria de agressividade C4 e

C5), como ambientes a distâncias inferiores a 2 km da orla marítima, ambientes permanentemente úmidos ou em atmosferas que apresentem altas concentrações de agentes químicos corrosivos. Para tais aplicações torna-se necessária a consideração de uma espessura de sacrifício de modo a garantir o desempenho ao longo da vida da estrutura, é também recomendada a aplicação de pintura ou galvanização a quente sobre o aço como um recurso adicional de proteção contra a corrosão (PANONNI, 2011).

O estudo conduzido por Pannoni (2015) apresenta uma análise (Figura 4) de desempenho de um aço patinável estrutural em comparação a um aço-carbono de uso geral, relacionando a perda de massa ao longo do tempo em diferentes atmosferas.

Figura 4 – Análise comparativa de perda de massa ao longo do tempo entre um aço patinável e um aço carbono em diferentes atmosferas. Em (a) atmosfera industrial de Cubatão – SP, em (b) atmosfera marinha de Bertioga – SP, em (c) atmosfera urbana de Santo André – SP e em (d) atmosfera rural de Itararé – SP.

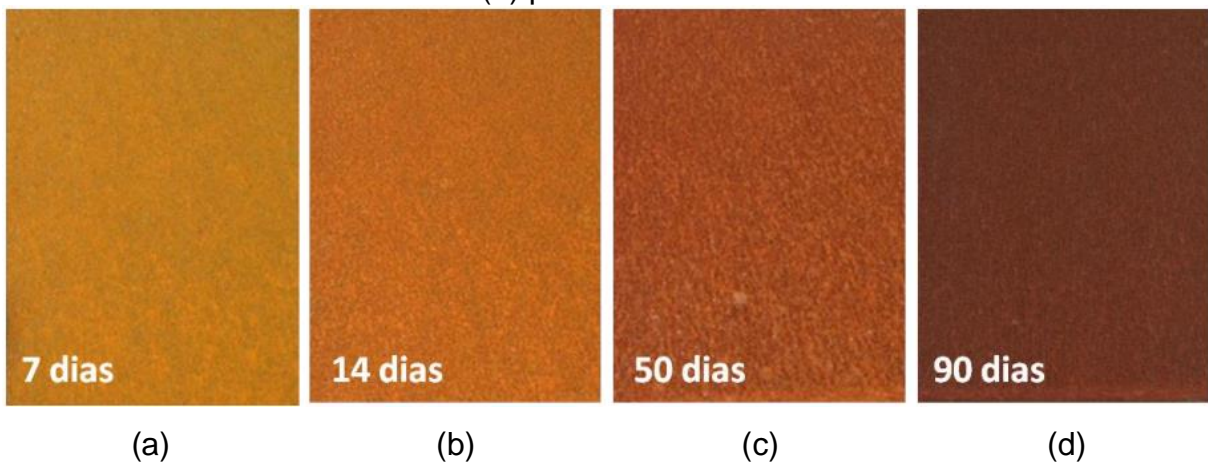


Fonte: Adaptado de (PANONNI, 2015)

Por meio dos dados apresentados neste estudo é possível constatar o excelente desempenho dos aços patináveis no que diz respeito a resistência a corrosão atmosférica e preservação de massa quando comparado ao desempenho de aços de uso comum.

A medida em que a camada de pátina vai se formando na superfície do material sua aparência em relação a coloração é alterada, apresentando inicialmente uma coloração alaranjada e progredindo para uma coloração marrom escura, bastante característica destes materiais. Em seu estudo Travassos (2020) analisou a evolução da camada de pátina e a alteração da coloração em algumas amostras de aço patinável expostas a atmosfera da cidade de São Paulo no período total de 90 dias.

Figura 5 – Evolução da cor da pátina de acordo com o período de exposição: Em (a) período de sete dias, em (b) período de quatorze dias, em (c) período de cinquenta dias e em (d) período de noventa dias.



Fonte: Travassos (2020)

Outra propriedade favorável para o emprego do aço patinável em sistemas construtivos é a sua excelente soldabilidade. Segundo Costa (2019) os aços patináveis possuem boa soldabilidade devido a presença de elementos de liga adicionados a composição, dentre os quais o silício possui maior influência pois sua ação desoxidante é responsável pela diminuição da ocorrência de porosidade no cordão, além de aumentar a molhabilidade e fluidez da poça de fusão quando associado ao oxigênio.

3.1.3 Utilização do aço patinável na construção civil

Em 1958 o arquiteto Eero Saarinen foi o responsável pela estreia do uso do aço Cor-Ten em elementos estruturais ao empregar o material na construção do prédio administrativo da Deere & Company, em Moline, no estado de Illinois. Devido a sua aparência distinta esse material foi inicialmente utilizado em obras arquitetônicas e monumentos públicos, fins para os quais é usado até os dias atuais, despertando interesse dos engenheiros de edificações da época que passaram a utilizá-lo em suas obras, expandindo assim sua utilização e aumentando sua notoriedade dentre os materiais empregados em sistemas construtivos (PANONNI 2004).

Em 1965 a primeira edificação multiandares de grande porte foi construída a partir da utilização de aço patinável, o “The Delay Center” (Figura 6) de 32 andares, localizado no distrito metropolitano da cidade de Chicago nos EUA (ALBRECHT *et al.*, 1984). Um monumento intitulado “Chicago Picasso” (Figura 6) que possui pouco mais de 15 metros de altura e cerca de 160 toneladas feito completamente de aço patinável, de autoria de Pablo Picasso, foi erguido frente ao edifício tornando-se um ícone urbano da cidade (GOVERNO DA CIDADE DE CHICAGO, 2023).

Figura 6 – Em (a) The Delay Plaza, e em (b) Chicago Picasso.



(a)



(b)

Fonte: Chicago Architecture Centrer (2023)

Devido ao sucesso do emprego de aços patináveis em torres de transmissão e edificações, aliado a possibilidade de minimizar o custo de manutenção da pintura da estrutura ao longo de sua vida, foram construídas nos EUA as primeiras pontes de aço patinável sem aplicação de pintura. Nesta mesma época o Japão e países da Europa como a França e Alemanha também passaram a construir pontes utilizando o material (ALBRECHT *et al.*, 1984).

De acordo com Panonni (2011) ao longo das décadas os aços patináveis foram utilizados majoritariamente na construção de pontes e viadutos, devido aos benefícios proporcionados pela escolha deste material para tais aplicações. Dentre os benefícios da utilização deste material neste tipo de estrutura destaca-se a manutenção simples, sendo suficiente inspeções periódicas e limpeza com água, tornando o seu uso ideal quando o acesso à estrutura é dificultado ou perigoso, como o caso da ponte intitulada “Burro Creek Bridge” (Figura 7) construída em 2007 sobre o cânion localizado entre as cidades de Phoenix e Las Vegas nos EUA.

Figura 7 – Em (a) Burro Creek Bridge sobre o cânion e em (b) processo de montagem da estrutura da ponte.



(a)

(b)

Fonte: Adaptado de National Steel Bridge Alliance (2023)

Em estruturas em que a aplicação de pintura é dispensada em projeto, o custo inicial da obra é, de modo geral, menor em relação a alternativas de estruturas pintadas por conta da eliminação do custo da matéria prima e mão de obra necessárias no processo. Outro fator benéfico é a redução do tempo de execução da obra, uma vez que o processo de pintura da estrutura envolve, além da preparação e

aplicação da tinta, a disponibilidade de matéria prima (geralmente fabricada pelo fornecedor sob demanda). Estudos direcionados a investigação do desempenho de pontes fabricadas de aço patinável nos últimos trinta anos, tanto no Brasil quanto no exterior, indicam bom comportamento das estruturas quanto a proposta a qual foram inicialmente projetadas, gerando maior confiabilidade a novos projetos com o emprego de aços patináveis (PANONNI 2011).

3.2 Fabricação de componentes estruturais

Esta sessão tem por objetivo expor o estudo sobre o processo de fabricação de componentes estruturais por meio da soldagem a arco elétrico, em sequência é exposto um estudo sobre os fenômenos causadores de tensões residuais e distorções geométricas decorrentes do processo de soldagem por arco elétrico em componentes estruturais e por fim apresenta-se um estudo acerca do processo de desempenho por chama em componentes estruturais.

3.2.1 Soldagem de composição de perfis metálicos estruturais

Os “aços estruturais” são aços desenvolvidos exclusivamente para uso na fabricação de componentes estruturais e são característicos por atenderem requisitos fundamentais para esta finalidade, como a elevada resistência mecânica, facilidade de fabricação, ampla disponibilidade e custo viável (GEOLOGIA E METALURGIA, 1955). No Brasil a fabricação e comercialização dos aços estruturais são regulamentadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas de acordo com a classe do material base, o processo de obtenção do produto final e a forma a qual é disponibilizado comercialmente (GUARNIER, 2009).

O aço estrutural disponível no mercado nacional é comercializado em forma de chapas e perfis. As chapas são produtos laminados de largura superior a 500 milímetros, sendo classificadas como “chapas finas” quando possuem espessura inferior ou igual a 5 milímetros e “chapas grossas” as que possuem espessura superior a 5 milímetros, sendo limitadas a espessura máxima de 150 milímetros. Os perfis são obtidos por meio de laminação, conformação a frio ou soldagem e sua classificação é

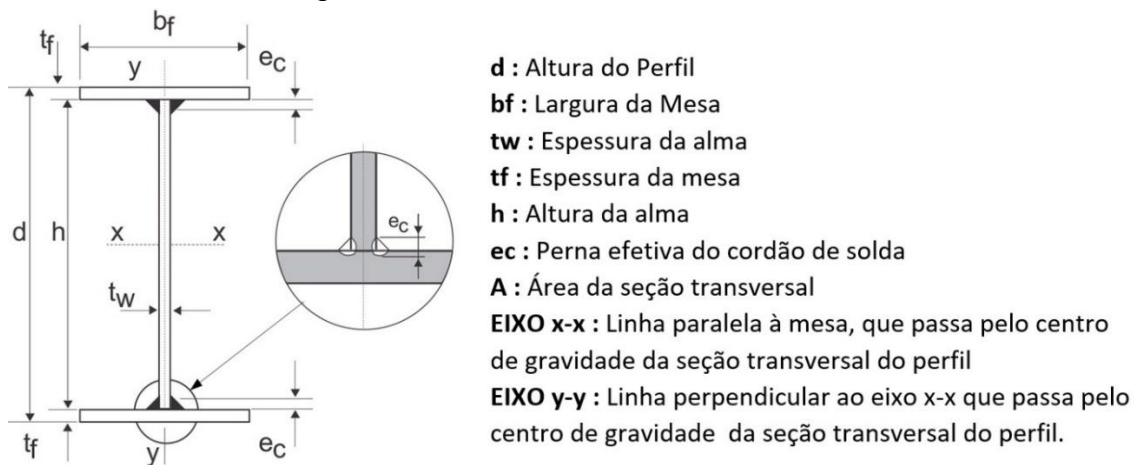
realizada de acordo com a semelhança da geometria da seção transversal do perfil com letras do alfabeto alfanumérico, como é o caso dos perfis I, H, T, U e Z, tendo por exceção o perfil L que é classificado como cantoneira (SILVA, 2012).

As distintas configurações geométricas dos perfis metálicos têm por propósito atender diferentes solicitações de projeto, sendo para algumas finalidades utilizados perfis específicos devido a sua compatibilidade aos parâmetros de resistência, custo, peso e estética desejados. Os perfis de seção tipo “I” são amplamente utilizados em elementos estruturais principais devido ao fato de apresentarem excelente resistência aos esforços mecânicos característicos de projetos de edificações em relação ao peso específico do elemento empregado (LORENZO *et al.*, 2016).

As usinas siderúrgicas brasileiras disponibilizam catálogos de perfis metálicos com dimensões padronizadas visando atender, de forma abrangente, as necessidades de projeto da indústria de fabricação de sistemas construtivos metálicos. Para cenários onde os perfis disponíveis comercialmente não satisfazem a necessidade demandada se faz necessária a fabricação do perfil de acordo com a solicitação de projeto, para estes casos a técnica mais utilizada é a união de chapas (previamente cortadas nas dimensões necessárias) por meio do processo de soldagem por arco elétrico (SILVA, 2012).

A fabricação de perfis I estruturais de aço soldado por arco elétrico (Figura 8) é regulamentada pela ABNT NBR 5884 quanto ao preparo do material, requisitos a serem atendidos durante o processo de soldagem, correção de não-conformidades e inspeção. Por definição “perfil I soldado: elemento estrutural construído por meio de três chapas de aço estrutural, unidas entre si por soldagem a arco elétrico, formando aproximadamente, em sua seção transversal, um I.” (ABNT, 2013, p.2).

Figura 8 – Perfil I soldado: Abreviaturas.



Fonte: Adaptado de Fam Construções Metálicas Pesadas (2023)

A indústria de fabricação de sistemas construtivos em estruturas metálicas destaca-se pela versatilidade, sendo comum a fabricação simultânea de estruturas com características construtivas bastante distintas, sendo os sistemas mais comuns edifícios de múltiplos andares, galpões, pontes e viadutos. Em edifícios de múltiplos andares e galpões o material comumente empregado é o aço para uso estrutural com aplicação de pintura ou galvanização, enquanto em pontes e viadutos é comum a utilização de aço estrutural de baixa liga e alta resistência, resistentes a corrosão atmosférica (GUARNIER, 2009).

Projetos de pontes de grandes vãos livres e viadutos fabricados com aço patinável são característicos pela singularidade de seus elementos estruturais quanto a suas características dimensionais e geométricas, exigindo um processo de fabricação que atenda a estas particularidades. Para estes casos o processo de composição de perfis por meio de soldagem a arco elétrico (Figura 9) destaca-se pela versatilidade proporcionada, uma vez que é possível a utilização de diferentes espessuras de chapa, cortadas em diferentes dimensões (conforme a demanda de projeto) e há processos de soldagem adequados para variadas configurações de montagem dos perfis (SILVA, 2012).

Figura 9 – Composição de um perfil I em aço patinável por meio de solda a arco submerso.



Fonte: O Autor (2023)

Por conta da excentricidade dos componentes estruturais fabricados de aço patinável a comercialização desta classe de aços no Brasil é limitada a chapas grossas, sendo a regulamentação para fabricação destas chapas prevista na ABNT NBR 5008 de título: Bobinas e chapas grossas laminadas a quente, de aço de baixa liga e alta resistência, resistentes à corrosão atmosférica, para uso estrutural — Requisitos (ABNT, 2015).

3.2.2 Tensões residuais e distorções em componentes estruturais decorrentes do processo de soldagem

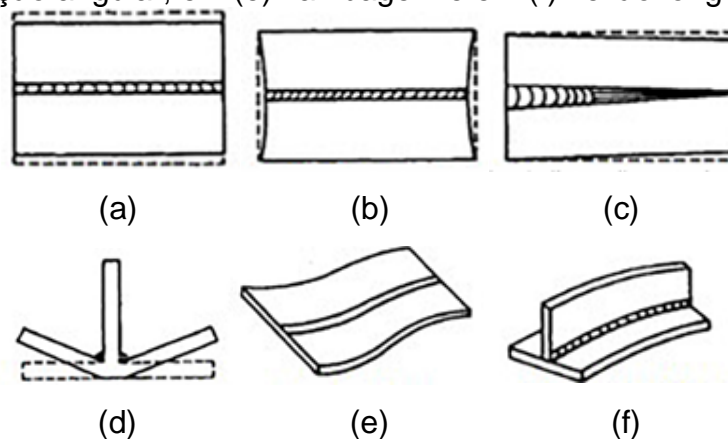
Operações de soldagem, em particular para processos de fusão, são características pela geração de calor intenso e localizado na região de união. O aquecimento faz com que a região que recebeu o aporte de calor tenda a dilatar-se, sendo esta dilatação dificultada pelas regiões adjacentes que naturalmente se encontram a temperaturas mais baixas. A alta energia térmica concentrada no material resulta em tensões residuais internas e deformações plásticas (MARQUES *et al.*, 2011).

É importante o entendimento dos efeitos causados pelo elevado fluxo de energia sobre a integridade funcional dos componentes soldados devido a alterações metalúrgicas e dimensionais que surgem como consequência desta energia imposta, tais como distorções geométricas e tensões residuais induzidas por tensões térmicas, trincas a quente e a frio, decoesão lamelar, alterações de propriedades mecânicas e microestruturais (PORTA NETO *et al.*, 2017, p.1).

Distorções geométricas podem afetar a forma de um componente de maneira global ou localizada, sendo a distorção final sempre oposta e, de maneira geral, de mesma ordem de grandeza de movimento do material ocorrida durante o processo de soldagem (MODENESI *et al.*, 2012).

Porta Neto *et al.* (2017) classifica as distorções de acordo com o tipo de deformação (Figura 10) gerada no componente, podendo ser classificadas como: contração transversal, contração longitudinal, distorção rotacional, distorção angular, flambagem e flexão longitudinal.

Figura 10 – Tipos de deformação decorrentes da soldagem: Em (a) contração transversal, em (b) contração longitudinal, em (c) contração rotacional, em (d) distorção angular, em (e) flambagem e em (f) flexão longitudinal.



Fonte: Porta Neto *et al.* (2017)

As tensões que geram distorções são classificadas conforme sua duração, direção e origem. Quanto a duração, as tensões temporárias estão presentes somente no momento em que o há ciclo térmico do processo de soldagem, enquanto as tensões permanentes são as que permanecem no material após o processo de soldagem, não havendo mais nenhum gradiente térmico ou forças externas sendo exercidas sobre o componente soldado (SOUL; HAMDY, 2012).

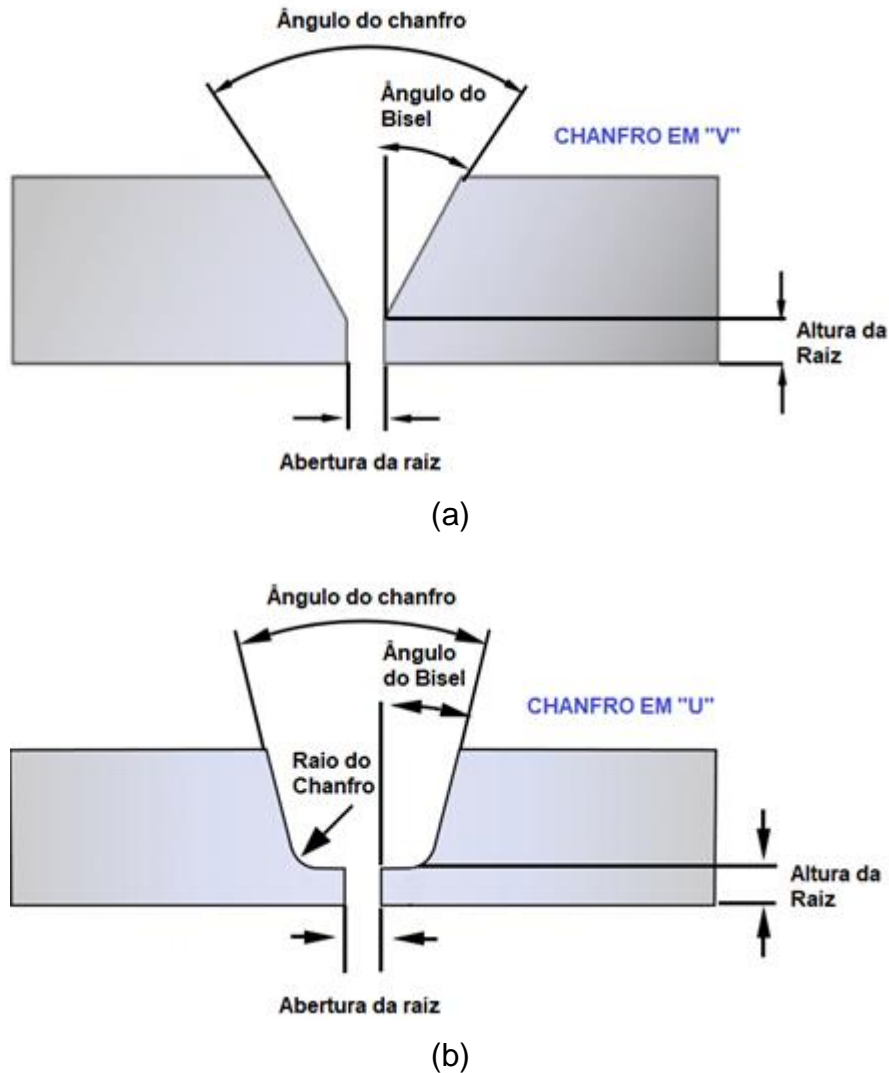
Conforme a direção, as tensões podem ser classificadas como transversais quando dispostas paralelamente ao sentido de soldagem e longitudinais quando dispostas no sentido de soldagem. Por fim, a origem das tensões é classificada como tensão térmica quando resulta de uma deformação plástica devido a mudança de temperatura ou tensão de transformação de fase quando causada por um ganho volumétrico do material ocasionado pela transformação de fases (SOUL; HAMDY, 2012).

De acordo com Cordeiro (2015) existe uma série de fatores que resultam no surgimento de distorções dimensionais, podendo ser classificados como: Parâmetros estruturais, parâmetros de fabricação e parâmetros do material base.

A análise da influência dos parâmetros estruturais na distorção inclui os mecanismos relacionados a dimensões da chapa, geometria do chanfro e o tipo de junta. Referente a características dimensionais, a espessura é o parâmetro de análise mais relevante. A ocorrência de distorções angulares é mais frequente em chapas espessas, devido a relação entre a espessura e o alto gradiente térmico através da chapa, resultado da elevada quantidade de energia térmica necessária para realizar a união. A ocorrência de tensões residuais internas em chapas espessas está relacionada a alta rigidez do material em conjunto ao alto gradiente térmico gerado durante o processo de soldagem (CORDEIRO, 2015).

Cordeiro (2015) afirma que o correto dimensionamento do chanfro pode mitigar a formação tensões residuais e distorções dimensionais. Embora resulte em uma maior adição de metal de solda relação a ângulos tipo “V”, a utilização de chanfros do tipo “U” (Figura 11) favorece a atenuação das tensões residuais devido ao fato do centroide do cordão de solda aproximar-se do eixo neutro da placa. Outro importante parâmetro diz respeito a profundidade do chanfro, que quando excessiva, favorece a ocorrência da distorção angular.

Figura 11 – Em (a) chanfro preparado em “V” e em (b) chanfro preparado em “U”.



Fonte: Adaptado de Amarine (2023)

Propriedades térmicas e mecânicas do material base são de elevada relevância na análise de tensões e distorções, dentre elas se destacam a tensão de escoamento, módulo de Young, coeficiente de expansão térmica, condutividade térmica e calor específico por possuírem maior influência sobre o surgimento de discontinuidades em processos de soldagem. Os valores de tensão de escoamento e o módulo de Young (propriedade vinculada a rigidez do material base) decrescem a medida em que a temperatura aumenta, porém se em altas temperaturas o limite do escoamento do material for elevado, as tensões térmicas serão incapazes de realizar transformações plásticas (CORDEIRO, 2015).

Elevados valores de coeficiente de expansão térmica resultam em uma maior quantidade de tensões geradas no processo de resfriamento, em contrapartida a alta condutividade térmica resulta na transmissão de calor com maior homogeneidade ao longo da peça, reduzindo a ação dos gradientes térmicos responsáveis pela formação de tensões. Valores elevados de calor específico estão relacionados a redução dos valores de temperatura máxima atingida durante o processo de soldagem, de maneira geral se deseja a diminuição da temperatura máxima atingida durante o processo de soldagem buscando evitar descontinuidades e alterações nas propriedades mecânicas e microestruturais do material (CORDEIRO, 2015).

Em estruturas metálicas as distorções geométricas que excedem os limites de tolerância dimensional podem ocasionar em interferência durante a união dos componentes estruturais, dificultando ou até mesmo impossibilitando a montagem da estrutura. As patologias que comprometem a integridade da estrutura em sistemas de construção metálicos fabricados de vigas soldadas, podem ser oriundas do processo de projeto e fabricação, neste aspecto se deseja a atenuação das não conformidades pelo correto dimensionamento dos parâmetros de soldagem de acordo com as características e propriedades do material a ser unido e a correta execução do processo de soldagem de composição dos perfis metálicos (PORTES, 2022).

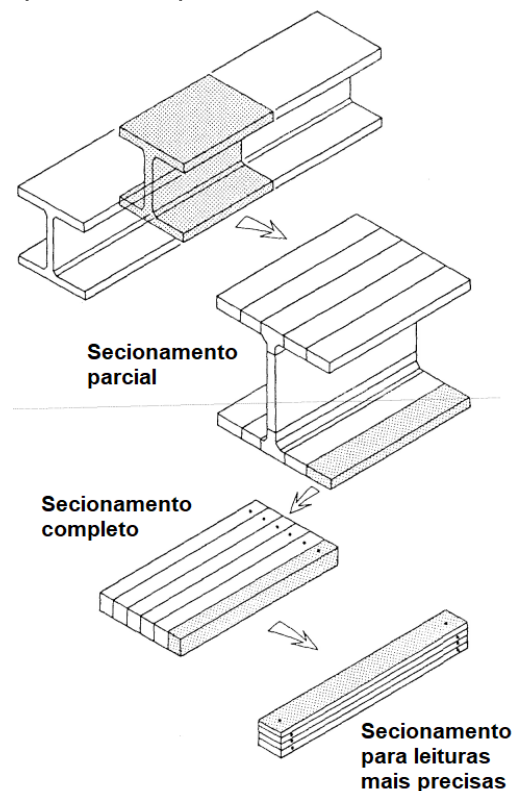
Para componentes estruturais soldados o processo de fabricação tem início no corte das chapas que constituem o perfil, quando este corte é realizado por processos térmicos como o corte a laser, plasma ou oxicorte, tensões residuais de tração são geradas nas extremidades da chapa onde o corte foi realizado (ROSSI, 2018).

Segundo Alpsten *et al.* (1970) o limite de escoamento do material e o processo de soldagem escolhido não são os principais fatores na análise do surgimento de tensões residuais. A geometria das chapas e a distribuição de tensões ao longo da espessura de chapas com espessura superior a uma polegada (25,4 milímetros), são variáveis relevantes na análise de distribuição e magnitude de tensões residuais, uma vez que as tensões residuais iniciais podem ter magnitude maior do que a tensões geradas pelo processo de soldagem.

Um eficiente método utilizado há décadas para realizar a medição de tensões residuais em componentes estruturais é o método do secionamento (Figura 12). Este

método consiste na alocação de extensômetros, igualmente espaçados, ao longo da seção transversal do perfil que deverá ser cortado em seções (estando obrigatoriamente alocado um extensômetro no centro de cada seção) no sentido longitudinal. O processo pode ser repetido através da instalação de extensômetros em uma das seções primárias que será seccionada de forma análoga ao processo anterior (TEBEDGE *et al.*, 1973).

Figura 12 – Sequência de processo do método de seccionamento.

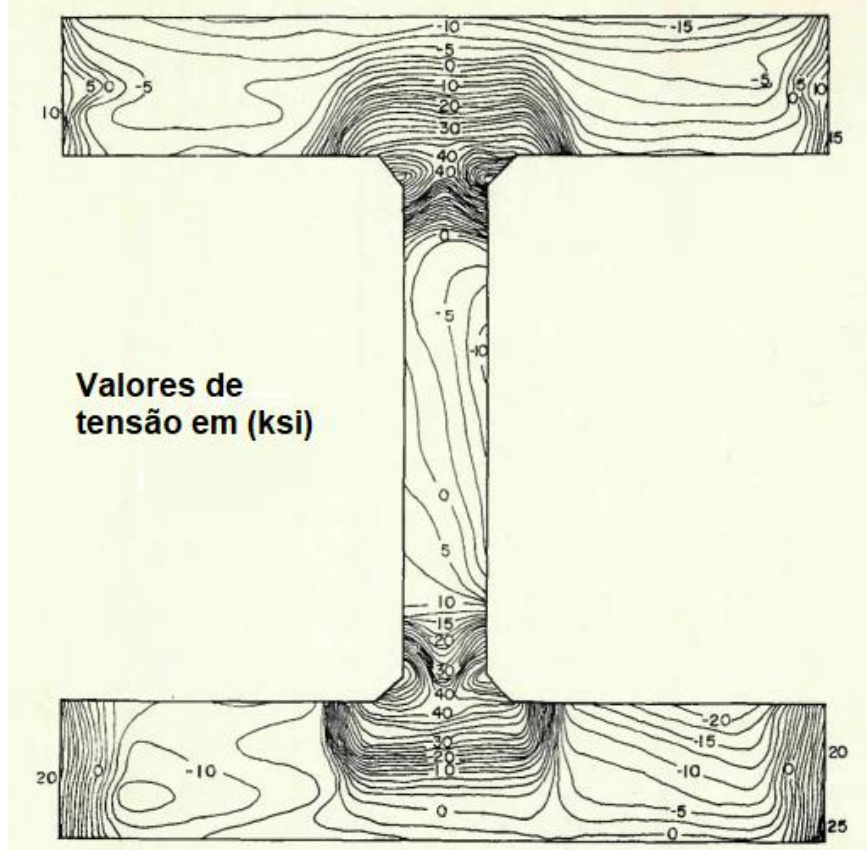


Fonte: Adaptado de Tebedge *et al.* (1973)

De acordo com Alpsten *et al.* (1970) através do método do seccionamento é possível realizar medições locais de tensões residuais devido ao alívio de tensões adjacentes geradas pelo seccionamento do perfil. Em seu estudo Alpsten *et al.* (1970) realizou medições por meio de extensômetros através do método de seccionamento com o objetivo de mensurar a distribuição de tensões residuais no interior de uma viga tipo “I” soldada de aço ASTM A36 fabricada com chapas previamente cortadas através de processos térmicos (Figura 13), por meio do qual foi possível constatar a presença

de tensões residuais consideráveis nas extremidades onde o corte térmico foi realizado.

Figura 13 – Distribuição de tensões residuais em uma viga tipo “I” soldada de aço ASTM A36 com chapas cortadas por meio de processo térmico.



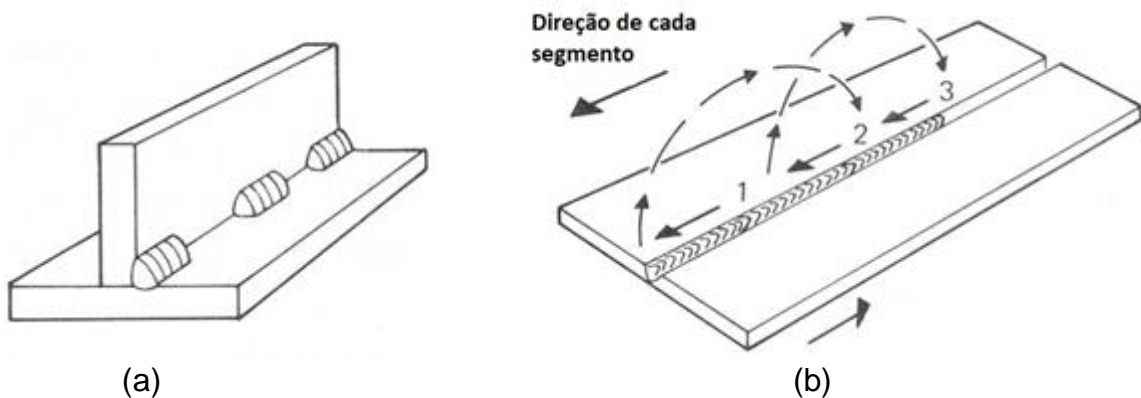
Fonte: Adaptado de Alpsten *et al.* (1970)

Em perfis estruturais soldados a união de chapas por meio da junta de filete em “T” é predominantemente utilizada devido as características construtivas e geométricas convencionais dos perfis, para esta configuração de união é comum a ocorrência de distorções angulares e a flexão longitudinal do componente durante o processo de soldagem. A distorção angular é gerada devido a região da junta onde o aporte de calor é realizado, devido a geometria do componente, o efeito de contração ocorre na face oposta ao processo térmico gerando a distorção característica pela elevação das abas da mesa. A flexão longitudinal ocorre devido ao aporte de calor por meio do processo de soldagem realizado ao longo de toda a extensão da junta, que origina a deformação característica do componente em forma de arco (VERDE, 2014).

As técnicas de correção de distorções são inerentes a fabricação de componentes estruturais soldados, porém Cordeiro (2015) afirma que a busca pela redução de tensões residuais geradas no processo é necessária e pode ser alcançada por meio da correta seleção dos parâmetros do processo de soldagem, de modo a assegurar a regulagem da tensão do equipamento, a correta vazão do gás e a velocidade apropriada de alimentação do arame, parâmetros estes que estão vinculados diretamente a velocidade adequada de execução da solda.

Um recurso bastante utilizado quando se deseja mitigar tensões e distorções durante o processo de soldagem é a adoção de uma sequência de solda adequada. A sequência de solda sugere a divisão do cordão de solda em segmentos através da execução de técnicas (Figura 14) como soldagem com passe a ré e a soldagem intercalada (SOARES, 2006).

Figura 14 – Técnicas de sequência de soldagem, em (a) soldagem intercalada e em (b) soldagem com passe a ré.



Fonte: Soares (2006)

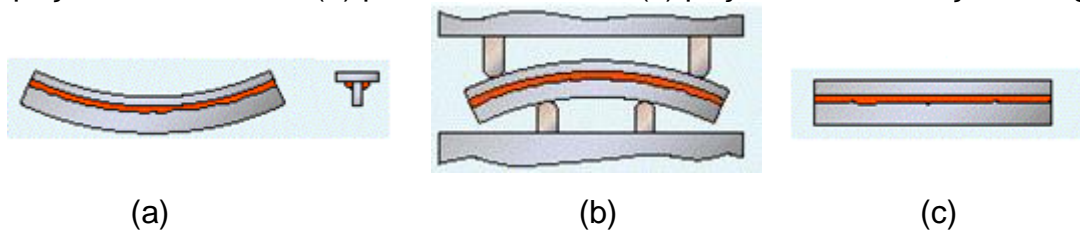
3.2.3 Desempenho por chama em componentes estruturais soldados

Após realizado o procedimento de soldagem, o alívio de tensões residuais e correção de distorções na peça ou estrutura pode ser realizado por meio de processos térmicos ou mecânicos. Processos térmicos têm por princípio a elevação da temperatura com o objetivo de atingir um estado onde há redução no limite de escoamento do material facilitando sua deformação plástica. Os métodos mecânicos por sua vez baseiam-se no princípio de alívio de tensão por meio da aplicação de um carregamento localizado em um ponto estratégico (MODENESI *et al.*, 2012)

Conforme afirma Twi (2023) as técnicas de correção de distorção em peças metálicas por esforços mecânicos mais comuns são o martelamento e o prensamento. O martelamento consiste na aplicação de carga de impacto sobre a peça, por meio de um martelo manual ou hidráulico, com o objetivo de corrigir deformações. A aplicação desta técnica tende a ser trabalhosa, além de danificar a superfície onde é executada, sendo recomendada sua aplicação apenas em componentes que necessitam de correções pontuais.

O prensamento corretivo (Figura 15) consiste na aplicação de carga sobre o componente por meio de matrizes fixadas em uma prensa, em pontos estratégicos, com o objetivo de corrigir deformações geométricas. Esta técnica é bastante eficaz devido a versatilidade de matrizes que podem ser utilizadas e a possibilidade de utilização de uma ampla escala de aplicação de cargas (TWI, 2023).

Figura 15 – Correção de distorção em um perfil “T” pelo método de prensamento: Em (a) peça deformada, em (b) prensamento e em (c) peça com deformação corrigida.



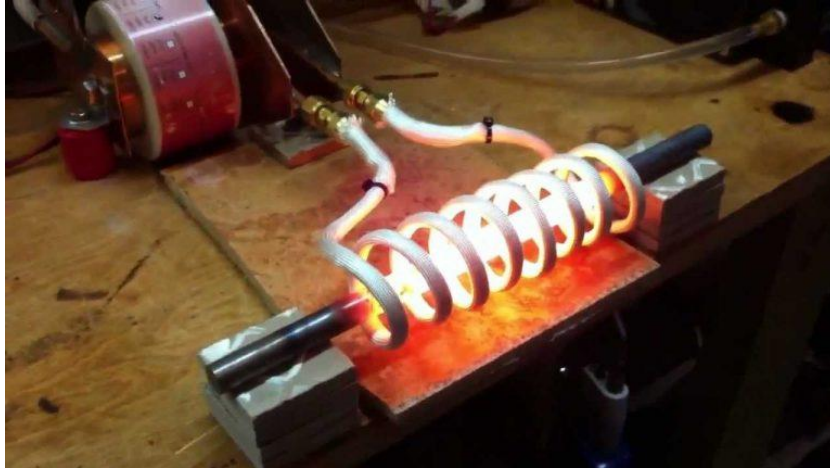
Fonte: Adaptado de Twi (2023)

No que diz respeito aos métodos de desempenho térmico, seus efeitos passaram a ser estudados empiricamente pelos primeiros soldadores que observavam o comportamento dos materiais soldados frente ao calor recebido durante o processo de soldagem. O efeito térmico passou a ser estudado com mais zelo e replicado de forma experimental, buscando atingir um comportamento previsível e controlado (AVANT, 2008).

As técnicas de correção de distorções em peças metálicas por métodos de princípio térmico mais comuns são o desempenho por chama e o desempenho por indução. O desempenho por indução (Figura 16) consiste na utilização de um indutor elétrico construído de modo que possa comportar em seu interior peças a serem aquecidas, sendo este aporte de calor realizado por meio da corrente induzida. Dentre as vantagens da utilização desta técnica em comparação ao método de desempenho

por chama, se destaca o aquecimento homogêneo da peça, a alta velocidade de aquecimento e o controle da taxa de aquecimento. Devido as características construtivas de indutores elétricos há limitação quanto a geometria e dimensões de peças compatíveis com este processo (LUCÍA *et al.*, 2013).

Figura 16 – Aquecimento de peça pelo método térmico de indução.

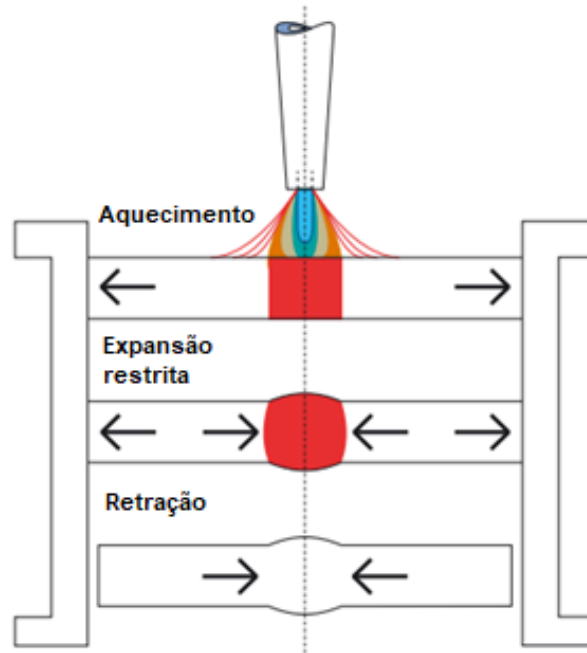


Fonte: Elprocus (2023)

O desempenho por chama consiste em uma técnica onde é realizado o aquecimento por chama em uma região específica da peça com o objetivo de reverter a distorção dimensional (SHIP STRUCTURE COMMITTEE, 1969). Para execução do processo podem ser utilizados dispositivos de ignição de chama escolhidos de acordo com as características dimensões e propriedades do material a ser reparado (BOC LIMITED, 2023).

De acordo com Boc Limited (2023) o processo de desempenho por chama (Figura 17) consiste em um aquecimento preciso e localizado, executado até atingir a temperatura necessária para que o material alcance o regime elástico, resultando em uma expansão térmica restrita. O material da vizinhança da região aquecida apresenta naturalmente uma temperatura mais baixa, fator este responsável pela limitação da expansão do material e aceleração da taxa de resfriamento da área aquecida, resultando no fenômeno de retração. A magnitude da retração está diretamente relacionada com a quantidade de calor fornecida durante o processo de aquecimento e a taxa a qual o resfriamento ocorreu.

Figura 17 – Princípio do processo de Desempeno por Chama.



Fonte: Adaptado de Boc Limited (2023)

Embora possua forte embasamento científico, o desempenho por chama é um processo realizado com base no conhecimento empírico e experiência do operador. Esta técnica está limitada a aplicação em algumas situações específicas, sendo necessário para cenários de distorção mais complexos uma análise e ponderação mais profunda para determinar o método de desempenho mais adequado (SCHÄEFER *et al.*, 2010).

O desempenho por chama pode ser aplicado a qualquer material que seja submetido ao processo de soldagem, devendo ser observada a temperatura de operação adequada para cada material conforme suas propriedades térmicas. Esta técnica é executada por meio de dispositivos de ignição de gases, sendo os gases mais utilizados o acetileno em conjunto com o oxigênio devido ao seu poder calorífico, porém também é comum a utilização de gás liquefeito de petróleo em conjunto com o oxigênio a depender da demanda de aplicação (BOC LIMITED, 2023).

De acordo com Schäfer *et al.* (2010) para os aços, de maneira abrangente, é recomendável que a temperatura máxima atingida durante o processo de desempenho não exceda o valor de 700°C com o objetivo de preservar as propriedades do material. Conforme constatado em seu estudo Schäfer *et al.* (2010) afirma que

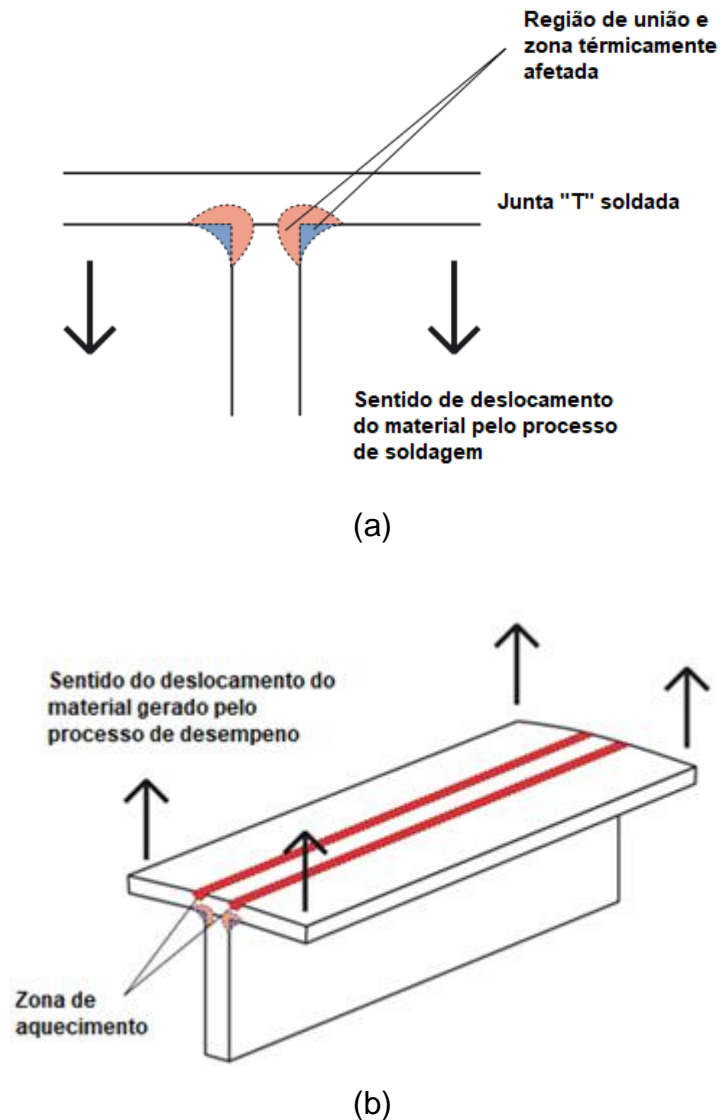
temperaturas de operação inferiores a 700°C não possuem potencial de alteração de propriedades do material, enquanto para temperaturas superiores a esta se torna necessária a análise levando em consideração a relação entre a temperatura máxima atingida e o tempo em que a peça ficou submetida a ela.

O método de desempenho por chama é amplamente utilizado para reparo de diversos componentes metálicos com finalidades e características distintas, porém sua utilização é de suma importância em aplicações específicas as quais outros métodos se apresentam ineficientes ou até mesmo inviáveis. Dentre as principais aplicações deste método se destacam o desempenho de elementos estruturais metálicos na indústria de construção civil e o desempenho de chapas constituintes do casco de embarcações na indústria naval (SHIP STRUCTURE COMMITTEE, 1969).

Na fabricação de elementos estruturais, principalmente em vigas soldadas, a correção de peças deformadas por meio do método de desempenho por chama integra o processo global de fabricação, devido à alta frequência de ocorrência de distorções geométricas geradas durante o processo de soldagem dos componentes. Neste cenário é comum a fabricação de componentes com características geométricas similares, como é o caso dos perfis “I” e “H”, deste modo o comportamento destes componentes frente as distorções provenientes do processo de soldagem é, na maioria dos casos, bastante característico e frequente (SCHAËFER et al. 2010).

Durante o processo de composição de perfis estruturais soldados com juntas do tipo filete em “T”, é comum o surgimento de distorções angulares que causam desalinhamento nas abas dos perfis. O calor proveniente da soldagem na região de união da junta promove o fenômeno de expansão restrita e contração posterior, fazendo com que as abas do perfil sofram desalinhamento em relação a posição inicial anterior ao procedimento de soldagem, conforme ilustrado na Figura 18 (a). Para esta classe de distorção a técnica mais utilizada é o aporte de calor por meio de chama realizado na face oposta da junta, conforme ilustrado na Figura 18 em (b), promovendo o mesmo fenômeno térmico, porém no sentido oposto (BOC LIMITED, 2023).

Figura 18 – Em (a) sentido da distorção angular em juntas soldadas de filete “T” e em (b) sentido do desempenho realizado em juntas soldadas de filete “T”.



Fonte: Adaptado de Boc Limited (2023)

Nesta técnica o aporte de calor ideal é realizado de forma linear em velocidade constante ao longo de toda a extensão do componente, sendo necessária a repetição do procedimento de forma cíclica, a depender da magnitude da distorção e das características dimensionais do perfil. Embora possa ser realizada de forma automatizada, a execução manual (Figura 19) deste método é comum, de modo que se torna necessária a experiência do operador quanto a resposta do perfil frente aos parâmetros utilizados no processo (MODENESI *et al.*, 2012).

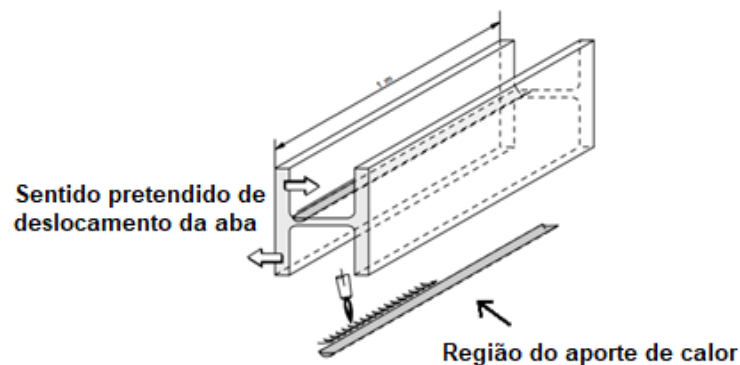
Figura 19 – Desempeno manual por chama para correção de distorção angular em uma viga “I” estrutural.



Fonte: O Autor (2023)

Na fabricação de perfis tipo “I” soldados é comum a ocorrência de distorções angulares de paralelismo, que consistem no desalinhamento da mesa em relação a alma da viga, de forma que não desenvolvam entre si uma relação de paralelismo geométrico. Para correção de distorções de paralelismo o aporte de calor é realizado na região acima do cordão soldado (Figura 20) da aba que possui maior ângulo de abertura entre seu ponto neutro e o ponto neutro da alma (SCHÄEFER *et al.*, 2010).

Figura 20 – Processo de desempenho para distorções de paralelismo em componentes estruturais.



Fonte: Adaptado de Schäfer *et al.* (2010)

Schäefer *et al.* (2010) afirmam que o desempenho de paralelismo (Figura 21) é realizado de forma análoga ao desempenho das demais distorções angulares, se fazendo valer as mesmas diretrizes quanto a parâmetros de operação e execução.

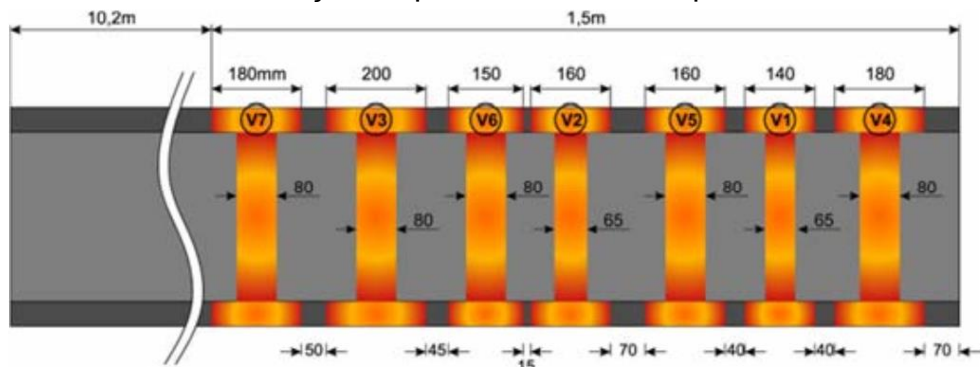
Figura 21 – Desempeno manual por chama para correção de distorção de paralelismo em uma viga “I” estrutural.



Fonte: O Autor (2023)

A técnica de desempenho aplicada em componentes que apresentam distorções de flexão longitudinal, após o processo de soldagem, consiste no aporte regional de calor em um padrão específico na região da viga tracionada pelo esforço fletor (BOC LIMITED, 2023). Em seu trabalho Schäefer *et al.* (2010) estudou o procedimento do desempenho de flexão longitudinal uma viga tipo “I” estrutural em um caso real. No caso estudado em específico, o aporte de calor foi realizado tanto nas abas das mesas quanto na alma do componente, na região tracionada pelo esforço de flexão. O esquema da figura 22 (a) apresenta as regiões do componente que foram aquecidas, distintas pela coloração alaranjada, o componente é apresentado em (b) após efetuado o desempenho.

Figura 22 – Em (a) esquema de aquecimento da peça e em (b) componente após realização do processo de desempenho.



(a)



(b)

Fonte: Schäfer *et al.* (2010)

Os parâmetros observados por Schäfer *et al.* (2010) em seu estudo, estão de acordo com a normativa CEN/TR 10347 do comitê europeu de regulamentação que estabelece os parâmetros de operação para o processo de desempenho por chama determinando que o valor de 650°C não seja ultrapassado durante o processo.

Embora existam técnicas específicas de desempenho por chama para determinados padrões de distorção, o processo se mantém dependente da habilidade e experiência do operador quanto ao comportamento do material em virtude do calor aplicado a ele, assim como aos parâmetros que influem no processo, uma vez que as distorções nem sempre obedecem aos padrões frequentemente observados (MODENESI *et al.*, 2012).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os objetos de estudo adotados para realização das simulações dos ciclos térmicos de desempenho foram duas seções de viga “I” de aço pátinável, soldadas através do método de soldagem por arco elétrico. As chapas componentes do perfil foram cortadas nas dimensões exigidas por meio do processo de oxicorte. Os componentes descritos são apresentados na Figura 23.

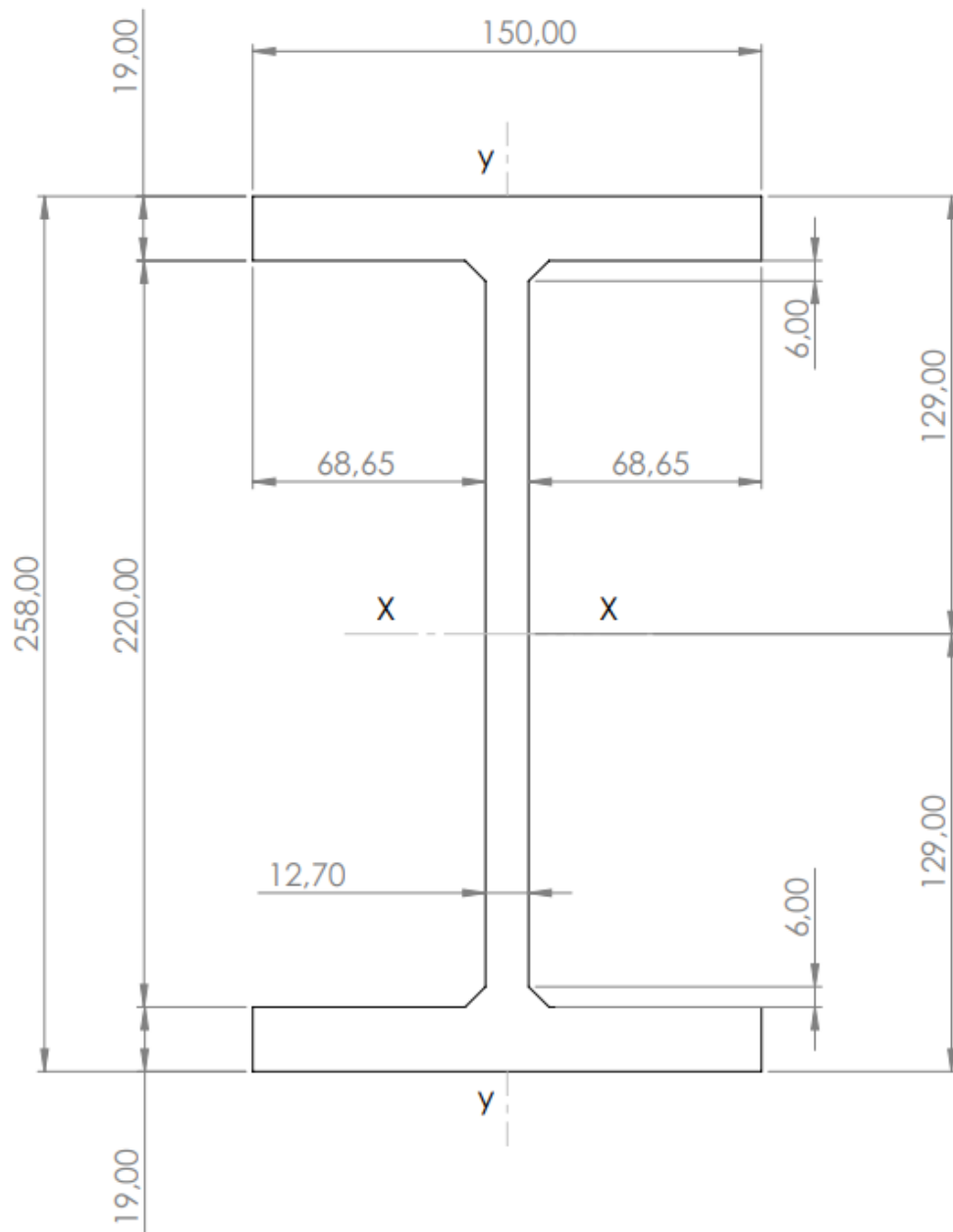
Figura 23 – Seções de viga “I” adotadas como objeto de estudo.



Fonte: O Autor (2023)

Ambas as seções foram fabricadas com comprimento total igual a 500 milímetros e dimensões de seção transversal conforme apresentado na Figura 24.

Figura 24 – Dimensões da seção transversal do perfil de estudo.



Fonte: O Autor (2023)

O material base utilizado para fabricação dos perfis foi o aço patinável de denominação comercial WS 350 da usina Gerdau, fabricado de acordo com os parâmetros estabelecidos na norma NBR 5008. A composição química do material é apresentada na Tabela 3 que possui informações retiradas diretamente do certificado de qualidade do material fornecido pela usina.

Tabela 3 – Composição química do Aço WS 350 conforme certificado de qualidade do material.

Composição Química - WS 350												
C(%)	Mn(%)	Si(%)	P(%)	S(%)	Al T(%)	Cr(%)	Cu(%)	Ti(%)	Mo(%)	Nb(%)	Ni(%)	
0,13	1,26	0,36	0,022	0,001	0,031	0,01	0,38	0,014	0,01	0,025	0,25	

Fonte: O Autor (2023)

A solda de união foi realizada por um soldador profissional qualificado, experiente na fabricação de estruturas metálicas. Os parâmetros de soldagem utilizados foram selecionados pelo operador, visando garantir a resistência exigida em componentes estruturais usualmente fabricados nesta configuração.

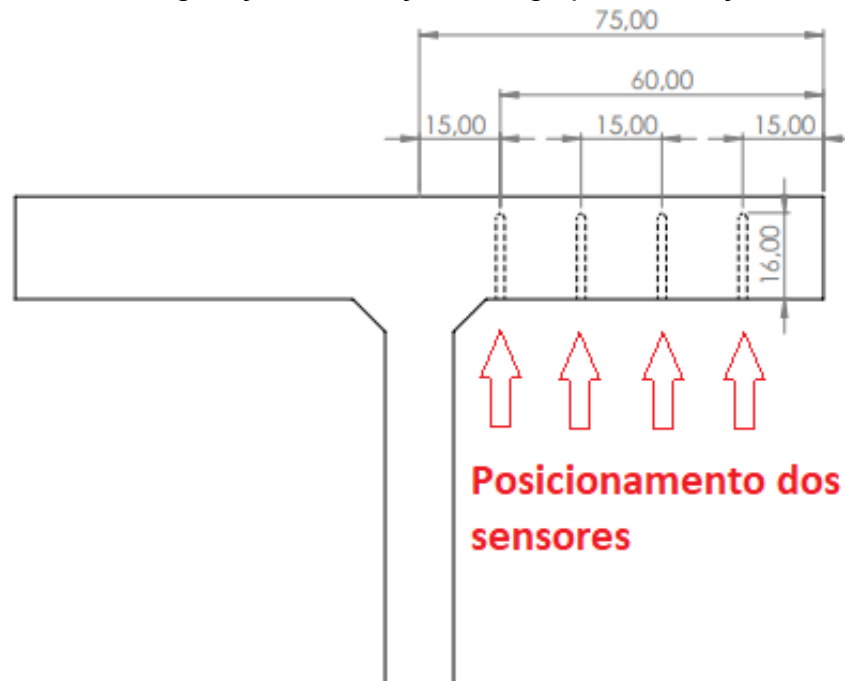
Com o objetivo de realizar a leitura e registro de valores de temperatura durante a simulação, foram instalados quatro sensores de aquisição de temperatura na mesa superior de uma das vigas (Figura 25). A configuração da furação para alocação dos sensores é ilustrada na Figura 26 (Apresentada com mais detalhes no apêndice A) e foi prevista de modo que a leitura fosse realizada no sentido transversal da flange superior, onde o aporte de calor deve ser realizado, de modo a registrar o gradiente de temperatura em virtude da transferência de calor neste sentido. A broca utilizada para realizar a furação possui diâmetro nominal igual a 1,6 milímetros.

Figura 25 – Configuração de instalação dos sensores na viga.



Fonte: O Autor (2023)

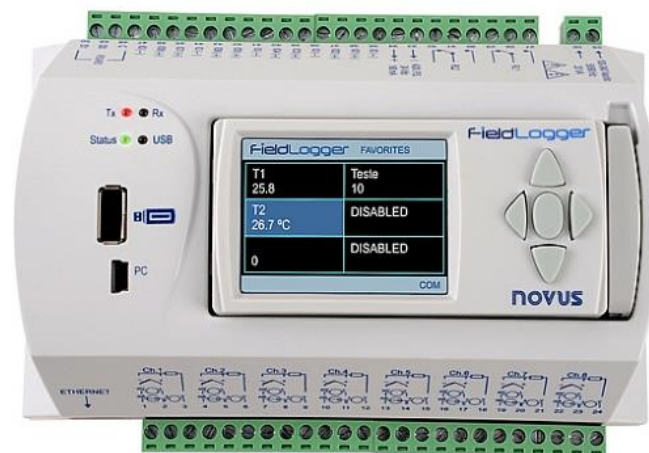
Figura 26 – Configuração da furação na viga para alocação dos sensores.



Fonte: O Autor (2023)

Os sensores utilizados foram termopares do tipo K de isolamento mineral e bainha de aço inoxidável AISI 310, com diâmetro nominal de 1,6 milímetros, ligados ao módulo de aquisição de dados FieldLogger (Figura 27) da fabricante Novus que possui interface USB para realizar a conexão com computador para registro dos dados.

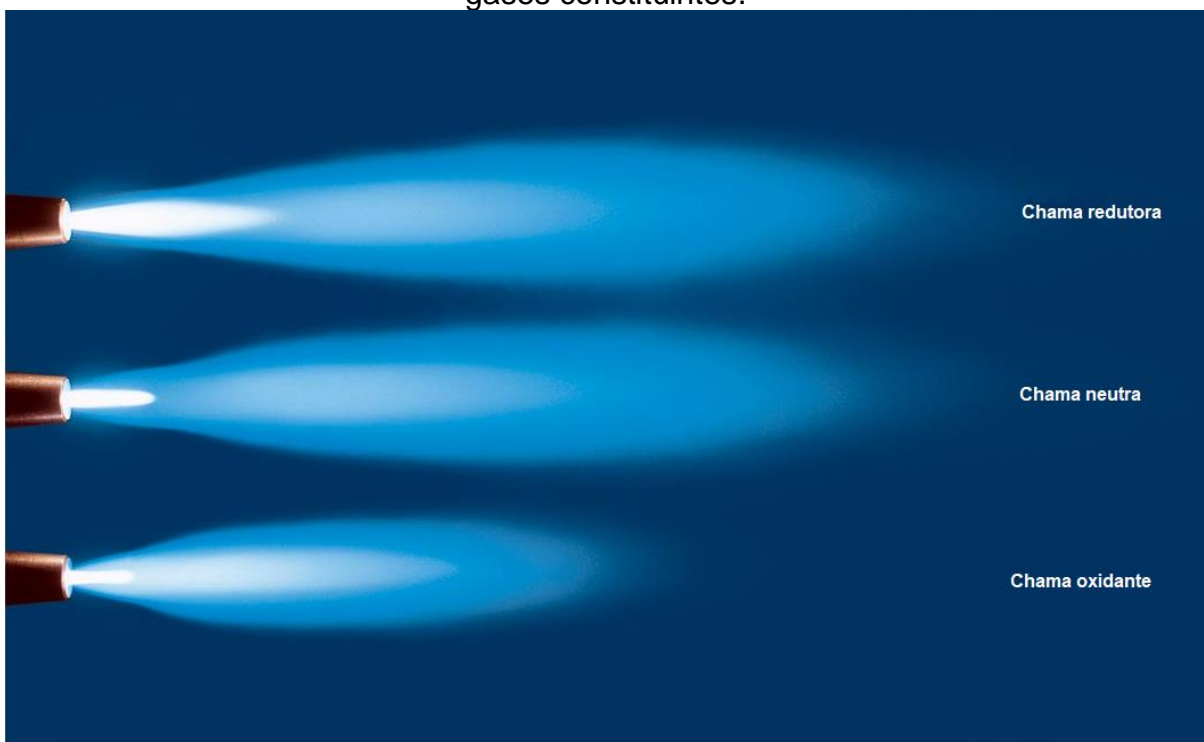
Figura 27 – Sistema de aquisição de dados multicanais Fieldlogger.



Fonte: Novus (2023)

Para realizar as simulações de ciclo térmico de aquecimento para desempenho da viga, foi utilizado um dispositivo de ignição de chama tipo maçarico com tocha misturadora e bocal de diâmetro de nove milímetros, fixado a um suporte estático com o objetivo de garantir a estabilidade da chama. Os gases utilizados no processo foram o oxigênio e acetileno misturados em proporção necessária para gerar a configuração de chama oxidante (Figura 28).

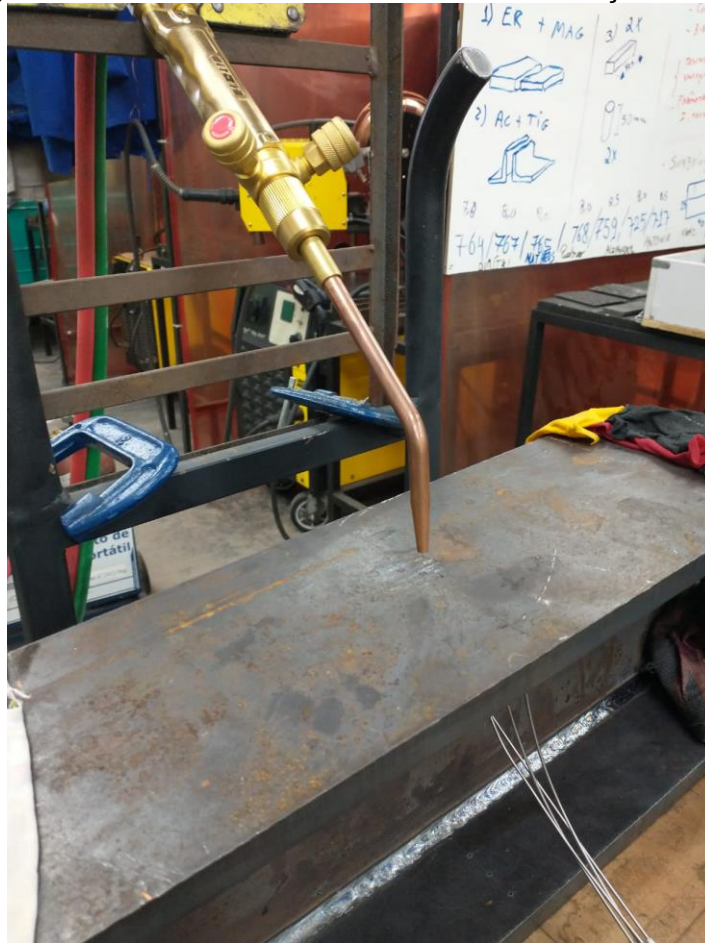
Figura 28 – Configurações de chama de acordo com a proporção de mistura dos gases constituintes.



Fonte: Adaptado de Boc Limited (2023)

Para a realização da primeira simulação de ciclo térmico, uma das vigas foi posicionada em uma superfície plana e elevada, com altura suficiente para proporcionar a correta execução do experimento, a tocha do maçarico foi posicionada de forma a ficar alinhada no centro da superfície da mesa superior da viga (Figura 29), tanto no sentido longitudinal quanto no sentido transversal e o ajuste de altura da distância do bocal do maçarico em relação a superfície foi de 12 milímetros.

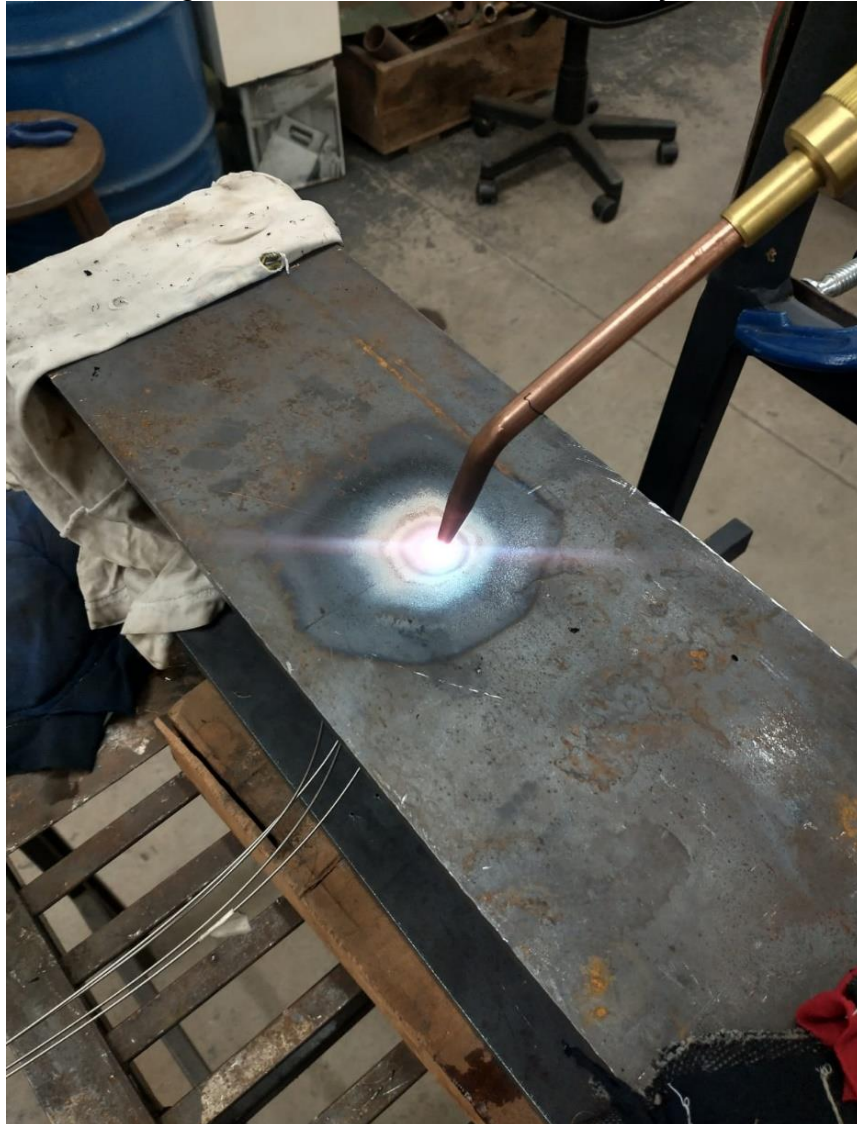
Figura 29 – Posicionamento da tocha em relação a viga.



Fonte: O Autor (2023)

Panos embebidos em água foram atados as extremidades da peça, antes do início do ciclo térmico, com o objetivo de simular a continuidade da viga por meio do aumento da dissipação térmica. Após iniciada a ignição, com a tocha já posicionada, o aquecimento da viga foi realizado até que a temperatura registrada no sensor mais próximo a fonte de calor fosse igual a 650°C (Figura 30), em seguida o fluxo dos gases foi interrompido cessando a chama. Por fim, o resfriamento aconteceu de modo natural, não forçado. Os sensores termopares foram removidos da viga para que pudessem ser instalados na segunda viga para realização da segunda simulação.

Figura 30 – Ciclo térmico em execução.



Fonte: O Autor (2023)

Os dados foram coletados pelos sensores durante todo o ciclo térmico, desde o início do aquecimento até o momento em que a temperatura de resfriamento registrada atingiu 150°C. Os dados foram inicialmente armazenados no dispositivo FieldLogger e depois exportados para a memória do computador ao qual estava conectado para que fossem processados e analisados posteriormente.

Para a realização da segunda simulação de ciclo térmico a segunda viga foi posicionada na superfície utilizada na primeira simulação, os sensores termopares foram nela instalados de acordo com o esquema definido. A tocha do maçarico foi posicionada de forma a ficar alinhada no centro da superfície da mesa superior da

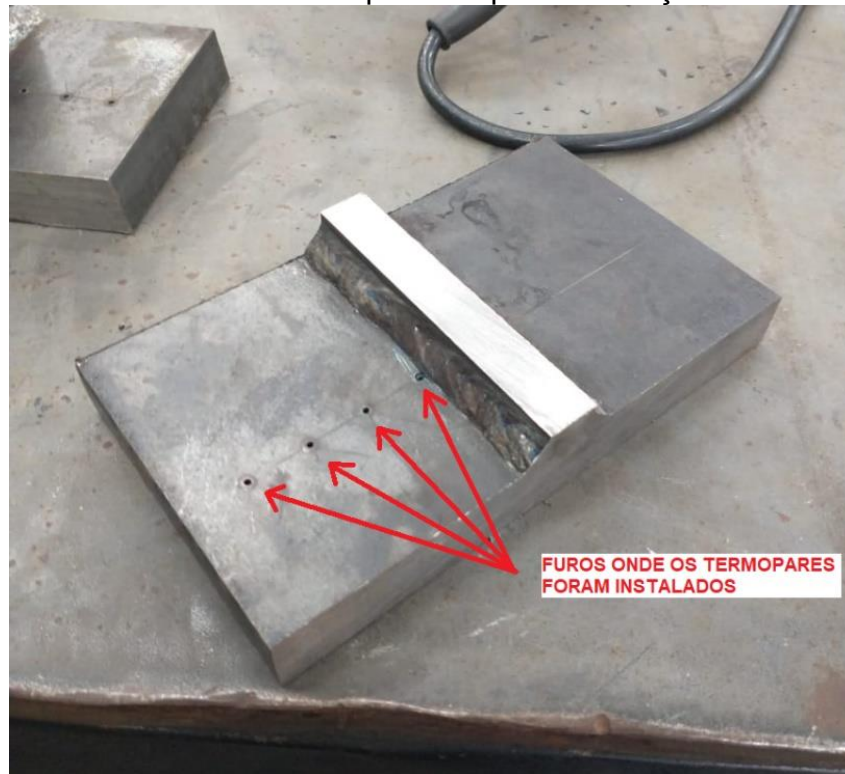
viga, tanto no sentido longitudinal quanto no sentido transversal e o ajuste de altura da distância do bocal do maçarico em relação a superfície foi de doze milímetros, de forma análoga a primeira simulação.

Panos embebidos em água foram atados as extremidades da peça, antes do início do ciclo térmico, com o objetivo de simular a continuidade da viga por meio do aumento da dissipação térmica. Após iniciada a ignição, com a tocha já posicionada, o aquecimento da viga foi realizado com o objetivo de que a temperatura registrada no sensor mais próximo a fonte de calor fosse igual a 650°C, porém a máxima temperatura registrada foi igual a 431°C. Constatado o não acréscimo de temperatura, após observar o comportamento da curva de aquecimento por alguns minutos, o fluxo dos gases foi interrompido cessando a chama. Por fim, o resfriamento aconteceu de modo forçado por meio do despejamento de 400 mililitros de água diretamente sobre a superfície, através de um recipiente de vidro graduado Becker.

De forma análoga a primeira simulação, os dados foram coletados pelos sensores durante todo o ciclo térmico, sendo inicialmente armazenados no dispositivo FieldLogger e depois exportados para a memória do computador para que fossem processados e analisados posteriormente. O início do registro dos dados ocorreu no momento em que a chama foi gerada pela ignição dos gases e perdurou até o momento em que a temperatura de resfriamento registrada atingiu 150°C.

Após a realização das simulações de ciclo térmico (considerando o completo resfriamento dos componentes), as vigas foram cortadas em um equipamento de serra de fita com o objetivo de gerar amostras (Figura 31) das regiões onde o aporte de calor foi realizado, com a finalidade de analisar a dureza da região por meio do ensaio de dureza Rockwell em escala B.

Figura 31 – Amostra retirada do componente para realização do ensaio de dureza.

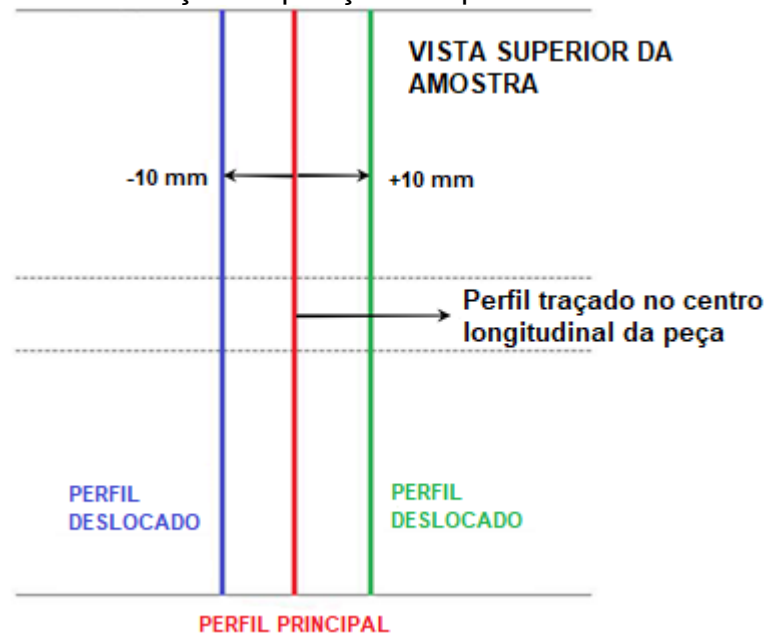


Fonte: O Autor (2023)

As amostras foram submetidas ao ensaio de dureza Rockwell na escala B e as leituras foram realizadas em três perfis distintos, traçados sobre a superfície onde foi realizado o aporte de calor. O primeiro perfil foi posicionado no centro longitudinal da peça ao longo de toda seção transversal, o segundo deslocado a dez milímetros do primeiro perfil na direção de uma das extremidades da peça e o último deslocado a dez milímetros do primeiro perfil na direção oposta à adotada para o segundo perfil. As leituras de dureza foram realizadas no sentido transversal da amostra, ao longo de cada um dos perfis, adotando o intervalo de cinco milímetros entre uma leitura e outra. O posicionamento dos perfis de dureza descrito é ilustrado na Figura 32.

Para efeitos de comparação, uma amostra do material base utilizado na fabricação dos componentes de estudo (não submetido ao tratamento térmico) foi submetida ao mesmo ensaio de dureza adotando os mesmos parâmetros estabelecidos para as amostras do componente tratado termicamente.

Figura 32 – Definição da posição dos perfis de dureza analisados.



Fonte: O Autor (2023)

Após realização dos ensaios de dureza, as amostras foram submetidas ao processo de retificação superficial, realizado em uma retífica plana, no qual foi retificada a superfície exposta a chama de modo que fosse removido completamente as endentações decorrentes do ensaio de dureza. Após a retificação foi realizado o processo de polimento, por meio de uma politriz, utilizando pastas de diamante de diferentes granulometrias. O polimento foi realizado de forma sequencial, utilizando pastas de diamante de quatro granulometrias médias diferentes, inicialmente realizado com uma pasta de granulometria média de 15 micrometros, na sequência uma pasta de granulometria média de 9 micrometros, seguida de uma pasta de granulometria média de 6 micrometros e por fim uma pasta de granulometria média de 3 micrometros.

Após realizado o polimento, as superfícies preparadas das amostras foram submetidas a um ataque químico com uma solução Nital composta de 1% em volume de ácido nítrico concentrado e 99% álcool etílico PA, com o objetivo de revelar a microestrutura da região de interesse. Após realizada a revelação pelo ataque químico, as amostras foram analisadas utilizando um microscópio metalográfico. As imagens obtidas no ensaio foram registradas através de uma câmera integrada ao equipamento.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

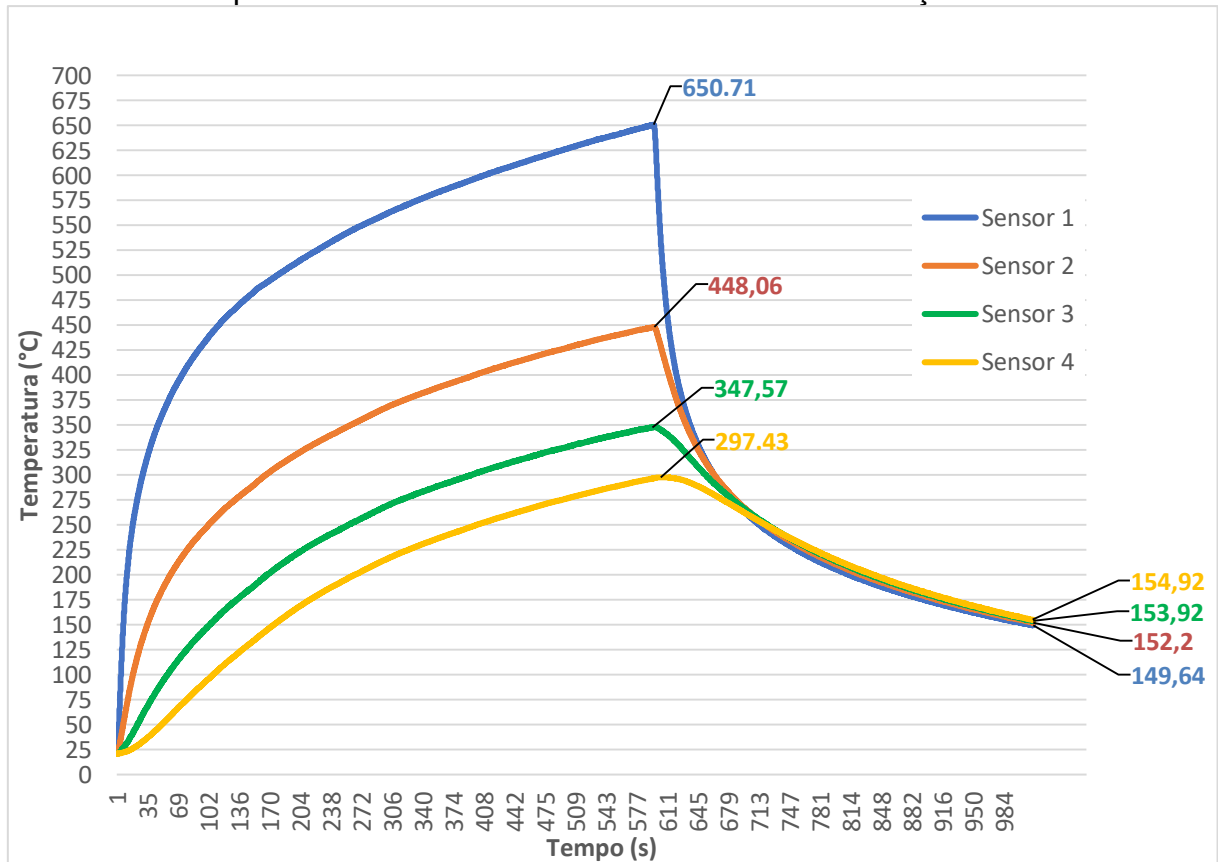
Esta seção do trabalho tem por objetivo a exposição e análise dos resultados obtidos através dos procedimentos descritos no capítulo anterior. Estes dados serão discutidos frente ao objetivo de investigação de alterações nas propriedades do material constituinte do componente estrutural quanto a sua aplicação prática.

5.1 Curvas de aquecimento e resfriamento

Com o objetivo de analisar o comportamento das curvas de aquecimento e resfriamento do material, os dados de leitura dos sensores termopar obtidos durante os ciclos térmicos de simulação de desempenho foram processados por meio de planilha eletrônica para gerar gráficos para análise. Os parâmetros adotados para análise gráfica foram o tempo de execução do ciclo e a temperatura registrada em cada sensor, com o objetivo de ilustrar a taxa de aquecimento e resfriamento do material durante a execução do ciclo.

As curvas de aquecimento e resfriamento do ciclo térmico da primeira simulação são apresentadas no gráfico da Figura 33, com valores do tempo de ensaio no eixo das abcissas e temperatura no eixo das ordenadas. Para esta análise os sensores foram identificados em ordem crescente, de acordo com o posicionamento descrito na seção anterior, conforme a proximidade do sensor em relação a fonte de calor, sendo o sensor 1 o mais próximo a fonte e o sensor 4 o mais distante.

Figura 33 – Gráfico da variação de temperatura em função do tempo para aquecimento e resfriamento da amostra da simulação 01.



Fonte: O Autor (2023)

Realizando uma análise dos dados apresentados a partir do início do ciclo até o momento onde a temperatura registada atinge seu máximo valor, para cada um dos sensores, é possível constatar o aquecimento uniforme no sentido transversal do componente, por meio do comportamento similar das curvas de aquecimento. As curvas de aquecimento registradas em cada sensor distinguem-se entre si pela máxima temperatura atingida e pelas diferentes taxas de aquecimento, fatores estes atrelados a distância do ponto de leitura em relação a fonte de calor.

Os valores registados de temperatura máxima atingida em cada sensor nesta simulação são apresentados a seguir:

- Sensor 1: 650,71 °C
- Sensor 2: 448,06 °C
- Sensor 3: 347,57 °C
- Sensor 4: 297,43 °C

O tempo total do estágio de aquecimento foi de 600 segundos, sendo o ponto inicial registado no momento da ignição da chama e o ponto final no momento em que o sensor mais próximo a fonte de calor registrou um valor de temperatura superior a 650°C e a chama foi extinta.

Considerando o equilíbrio térmico no componente no início do ciclo, adotando a temperatura inicial de 22°C, podemos determinar a taxa de aquecimento em cada ponto de leitura como:

$$\text{Taxa de aquecimento} = \frac{\text{Temperatura final} - \text{Temperatura inicial}}{\text{Duração do estágio de aquecimento}}$$

Portanto:

$$\text{Taxa de aquecimento no sensor 1} = \frac{650,71^{\circ}\text{C} - 22^{\circ}\text{C}}{600 \text{ s}} = 1,04^{\circ}\text{C/s}$$

$$\text{Taxa de aquecimento no sensor 2} = \frac{448,06^{\circ}\text{C} - 22^{\circ}\text{C}}{600 \text{ s}} = 0,71^{\circ}\text{C/s}$$

$$\text{Taxa de aquecimento no sensor 3} = \frac{347,57^{\circ}\text{C} - 22^{\circ}\text{C}}{600 \text{ s}} = 0,54^{\circ}\text{C/s}$$

$$\text{Taxa de aquecimento no sensor 4} = \frac{297,43^{\circ}\text{C} - 22^{\circ}\text{C}}{600 \text{ s}} = 0,46^{\circ}\text{C/s}$$

Uma queda nos valores de temperatura é percebida logo após a interrupção do fluxo dos gases (responsável pela extinção da chama) onde, de forma análoga as curvas de aquecimento, as curvas de resfriamento apresentam comportamento similar. Embora o aporte de calor tenha sido realizado em um ponto específico da viga, é possível constatar a propensão do material a atingir o equilíbrio térmico por meio da análise do comportamento das curvas de resfriamento ao longo do tempo, as quais apresentam valores que tendem linearmente ao mesmo valor de temperatura, denotando um resfriamento homogêneo.

O tempo total do estágio de resfriamento foi de 390 segundos, sendo o ponto inicial registado no momento da extinção da chama e o ponto final no momento em que um dos sensores registrou um valor de temperatura inferior a 151°C. Através da análise do comportamento das curvas de resfriamento é possível observar o efeito do método de resfriamento natural (não forçado) empregado neste experimento.

Obtendo o intervalo de diferença entre do máximo valor de temperatura registrado no estágio de aquecimento e o mínimo valor de temperatura registrado no fim do estágio de resfriamento, podemos determinar a taxa de resfriamento em cada ponto de leitura como:

$$\text{Taxa de resfriamento} = \frac{\text{Temperatura final} - \text{Temperatura inicial}}{\text{Duração do estágio de resfriamento}}$$

Portanto:

$$\text{Taxa de resfriamento no sensor 1} = \frac{149,64^{\circ}\text{C} - 650,71^{\circ}\text{C}}{390 \text{ s}} = -1,28 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$$

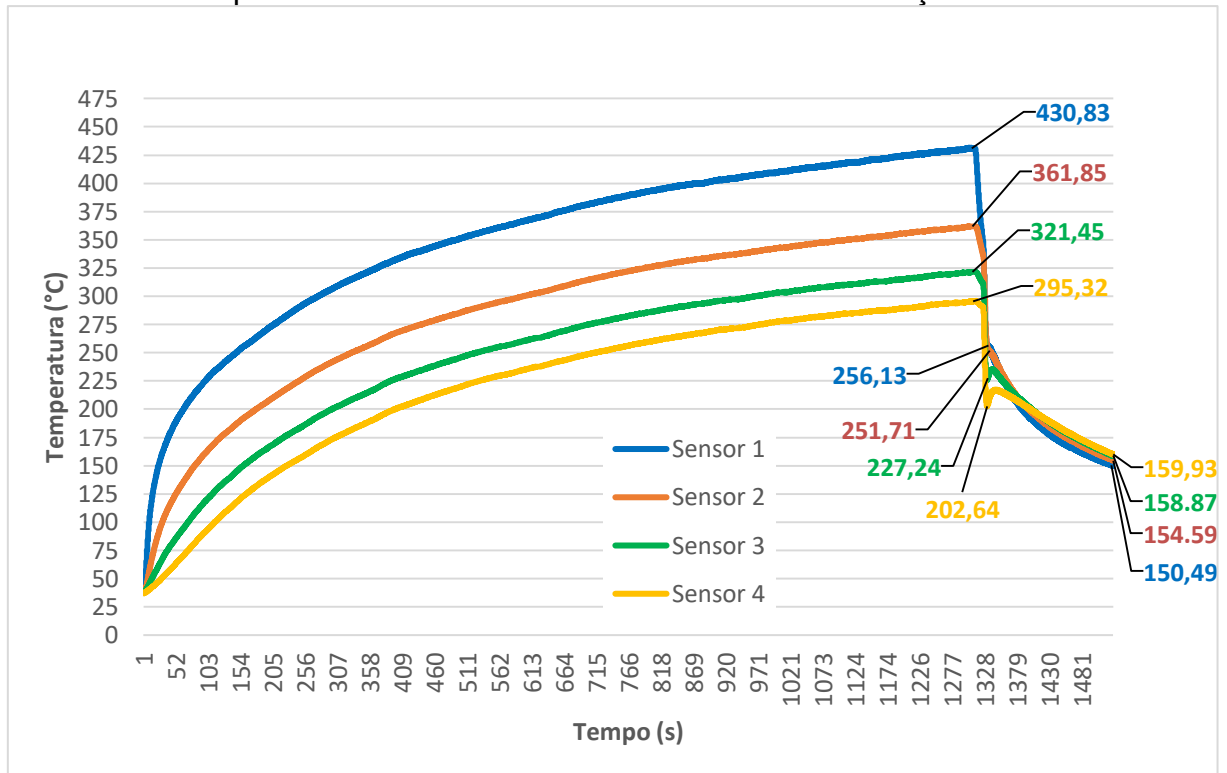
$$\text{Taxa de resfriamento no sensor 2} = \frac{152,20^{\circ}\text{C} - 448,06^{\circ}\text{C}}{390 \text{ s}} = -0,76 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$$

$$\text{Taxa de resfriamento no sensor 3} = \frac{153,92^{\circ}\text{C} - 347,57^{\circ}\text{C}}{390 \text{ s}} = -0,49 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$$

$$\text{Taxa de resfriamento no sensor 1} = \frac{154,92^{\circ}\text{C} - 297,43,71^{\circ}\text{C}}{390 \text{ s}} = -0,37 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$$

As curvas de aquecimento e resfriamento do ciclo térmico da segunda simulação são apresentadas no gráfico da Figura 34, com valores do tempo de ensaio no eixo das abcissas e temperatura no eixo das ordenadas. Para esta análise os sensores foram identificados em ordem crescente, de acordo com o posicionamento descrito na seção anterior, conforme a proximidade do sensor em relação a fonte de calor, sendo o sensor 1 o mais próximo a fonte e o sensor 4 o mais distante, de forma análoga a apresentação anterior.

Figura 34 – Gráfico da variação de temperatura em função do tempo para aquecimento e resfriamento da amostra da simulação 02.



Fonte: O Autor (2023)

Realizando uma análise dos dados apresentados a partir do início do ciclo até o momento onde a temperatura registada atinge seu máximo valor, para cada um dos sensores, é possível constatar o aquecimento uniforme no sentido transversal do componente, por meio do comportamento similar das curvas de aquecimento. As curvas de aquecimento registradas em cada sensor distinguem-se entre si pela máxima temperatura atingida e pelas diferentes taxas de aquecimento, fatores estes atrelados a distância do ponto de leitura em relação a fonte de calor. Em uma breve análise gráfica comparativa é notável a diferença entre as curvas de aquecimento da primeira simulação em relação as curvas da segunda simulação, quanto a duração do ciclo e taxas de aquecimento e resfriamento.

Os valores registados de temperatura máxima atingida em cada sensor nesta simulação são apresentados a seguir:

- Sensor 1: 430,83 °C
- Sensor 2: 361,65 °C

- Sensor 3: 321,45 °C
- Sensor 4: 295,32 °C

O tempo total do estágio de aquecimento foi de 1320 segundos, sendo o ponto inicial registado no momento da ignição da chama e o ponto final no momento em que o sensor mais próximo a fonte de calor registrou um valor de temperatura superior a 430°C e a chama foi extinta. A decisão pela extinção da chama neste ponto ocorreu em virtude da análise do comportamento da curva de aquecimento, que apresentou no sensor 01 um valor de temperatura inferior em relação ao máximo valor registado na primeira simulação, mesmo tendo superado em duas vezes o tempo do estágio de aquecimento da primeira simulação.

Considerando o equilíbrio térmico no componente no início do ciclo, adotando a temperatura inicial de 22°C, podemos determinar a taxa de aquecimento em cada ponto de leitura como:

$$\text{Taxa de aquecimento} = \frac{\text{Temperatura final} - \text{Temperatura inicial}}{\text{Duração do estágio de aquecimento}}$$

Portanto:

$$\text{Taxa de aquecimento no sensor 1} = \frac{430,83^{\circ}\text{C} - 22^{\circ}\text{C}}{1320 \text{ s}} = 0,31 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$$

$$\text{Taxa de aquecimento no sensor 2} = \frac{361,85^{\circ}\text{C} - 22^{\circ}\text{C}}{1320 \text{ s}} = 0,26 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$$

$$\text{Taxa de aquecimento no sensor 3} = \frac{321,45^{\circ}\text{C} - 22^{\circ}\text{C}}{1320 \text{ s}} = 0,22 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$$

$$\text{Taxa de aquecimento no sensor 4} = \frac{295,32^{\circ}\text{C} - 22^{\circ}\text{C}}{1320 \text{ s}} = 0,21 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$$

Uma queda nos valores de temperatura é percebida logo após a interrupção do fluxo dos gases (responsável pela extinção da chama) onde logo em seguida foi realizado um resfriamento forçado por meio de despejamento de água sobre o ponto onde foi realizado o aporte de calor, conforme descrito na seção anterior. Através da análise do gráfico é possível detectar essa variação devido ao comportamento característico das curvas, que apresentam uma queda brusca nos valores de

temperatura em um curto intervalo de tempo. Os mínimos valores de temperatura atingidos devido ao resfriamento forçado são indicados no gráfico com o objetivo de ilustrar melhor os efeitos deste processo.

Após o resfriamento abrupto, a análise do comportamento das curvas ao longo do tempo nos permite constatar a propensão do material a atingir o equilíbrio térmico, denotando um resfriamento homogêneo do componente.

O tempo total do estágio de resfriamento foi de 180 segundos, sendo o ponto inicial registado no momento da extinção da chama e o ponto final no momento em que um dos sensores registrou um valor de temperatura inferior a 151°C.

Obtendo o intervalo de diferença entre do máximo valor de temperatura registado no estágio de aquecimento e o mínimo valor de temperatura registado no fim do estágio de resfriamento, podemos determinar a taxa de resfriamento em cada ponto de leitura como:

$$\textit{Taxa de resfriamento} = \frac{\textit{Temperatura final} - \textit{Temperatura inicial}}{\textit{Duração do estágio de resfriamento}}$$

Portanto:

$$\textit{Taxa de resfriamento no sensor 1} = \frac{150,49^{\circ}\text{C} - 430,83^{\circ}\text{C}}{180 \text{ s}} = -1,55 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$$

$$\textit{Taxa de resfriamento no sensor 2} = \frac{154,59^{\circ}\text{C} - 361,85^{\circ}\text{C}}{180 \text{ s}} = -1,15 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$$

$$\textit{Taxa de resfriamento no sensor 3} = \frac{158,87^{\circ}\text{C} - 321,45^{\circ}\text{C}}{180 \text{ s}} = -0,90 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$$

$$\textit{Taxa de resfriamento no sensor 1} = \frac{150,49^{\circ}\text{C} - 256,13^{\circ}\text{C}}{180 \text{ s}} = -0,59 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$$

Através da análise comparativa das taxas de aquecimento (Quadro 2) obtidas pelos dados de cada sensor é possível constatar que o poder calorífico da chama utilizada na primeira simulação é superior ao da chama utilizada na segunda simulação. A taxa de aquecimento de 1,04°C/s obtida pelos dados registrados no sensor 01 na primeira simulação é cerca de três vezes maior em relação a taxa de aquecimento de 0,31°C/s obtida pelos dados registrados no sensor 01 na segunda simulação.

Quanto ao resfriamento, devido ao empregado de diferentes métodos em cada uma das simulações, a análise comparativa de taxas de resfriamento se mostra descabida. Os valores das taxas de resfriamento obtidas por meio dos registros de cada sensor são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 – Taxas de aquecimento e resfriamento das simulações 01 e 02

	Taxa de aquecimento (°C/s)		Taxa de resfriamento (°C/s)	
	Simulação 01	Simulação 02	Simulação 01	Simulação 02
Tempo	600 s	1320 s	390 s	180 s
Sensor 1	1,04	0,31	-1,28	-1,55
Sensor 2	0,71	0,26	-0,76	-1,15
Sensor 3	0,54	0,22	-0,49	-0,9
Sensor 4	0,46	0,21	-0,37	-0,59

Fonte: Própria (2023)

Embora o ajuste de chama em ambas simulações tenha sido realizado adotando os mesmos parâmetros, se constata a dificuldade em atingir uma chama de igual poder calorífico utilizando parâmetros visuais de ajuste de configuração de chama.

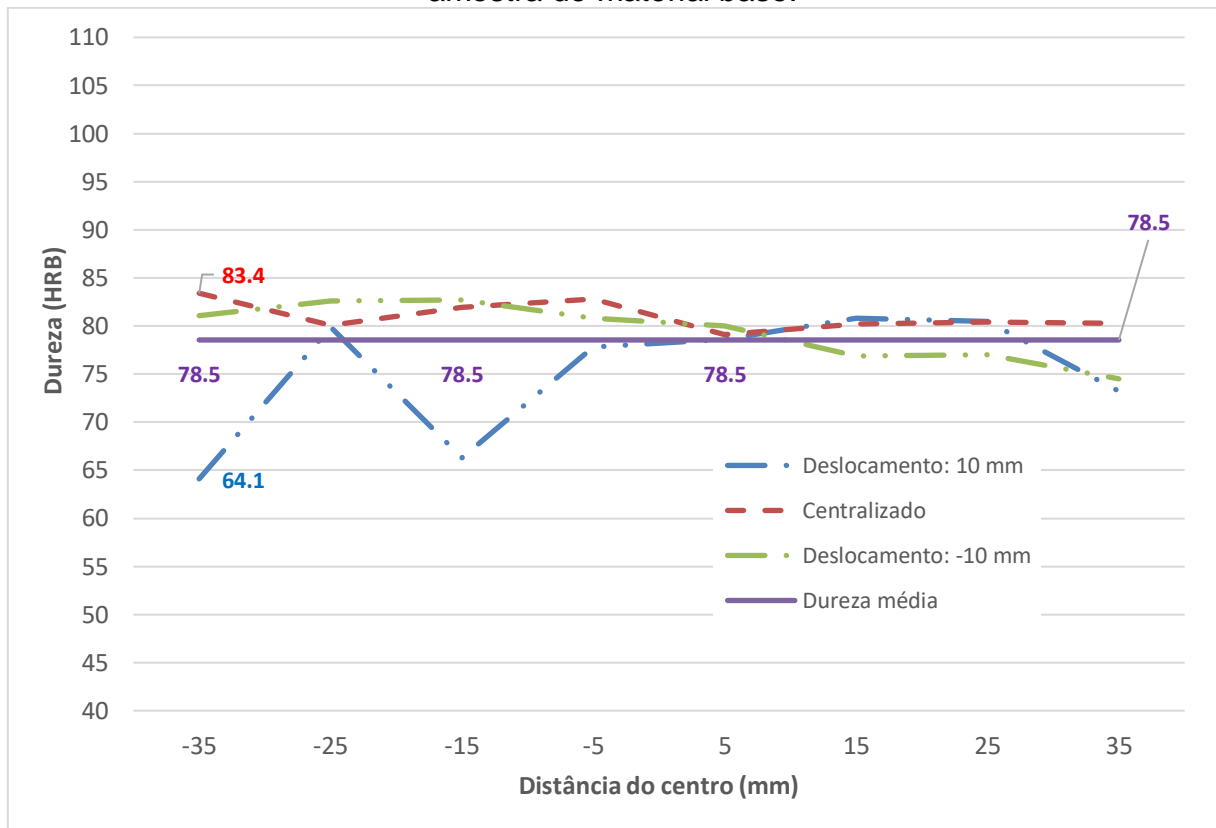
5.2 Perfis de dureza

Com o objetivo de analisar os efeitos da simulação do processo térmico de desempenho foram realizadas medições de dureza na superfície exposta ao aquecimento conforme descrito no capítulo anterior. Os parâmetros adotados para análise gráfica foram as medidas de dureza tomadas ao longo da seção transversal da amostra, relacionando os valores de dureza com a distância do ponto geométrico central do componente, onde foi realizado o aporte de calor durante o ciclo térmico.

As medidas de dureza foram realizadas em uma amostra do material base da viga soldada, anteriormente ao processo simulado de desempenho, com o objetivo de obter um parâmetro comparativo inicial. As medidas foram realizadas obedecendo ao parâmetro estabelecido no capítulo anterior, se diferenciando apenas pelo intervalo adotado, estabelecido como dez milímetros entre uma medição e outra. O gráfico

apresentado na figura 35 apresenta os valores de dureza obtidos ao longo da seção transversal do componente na amostra de material base.

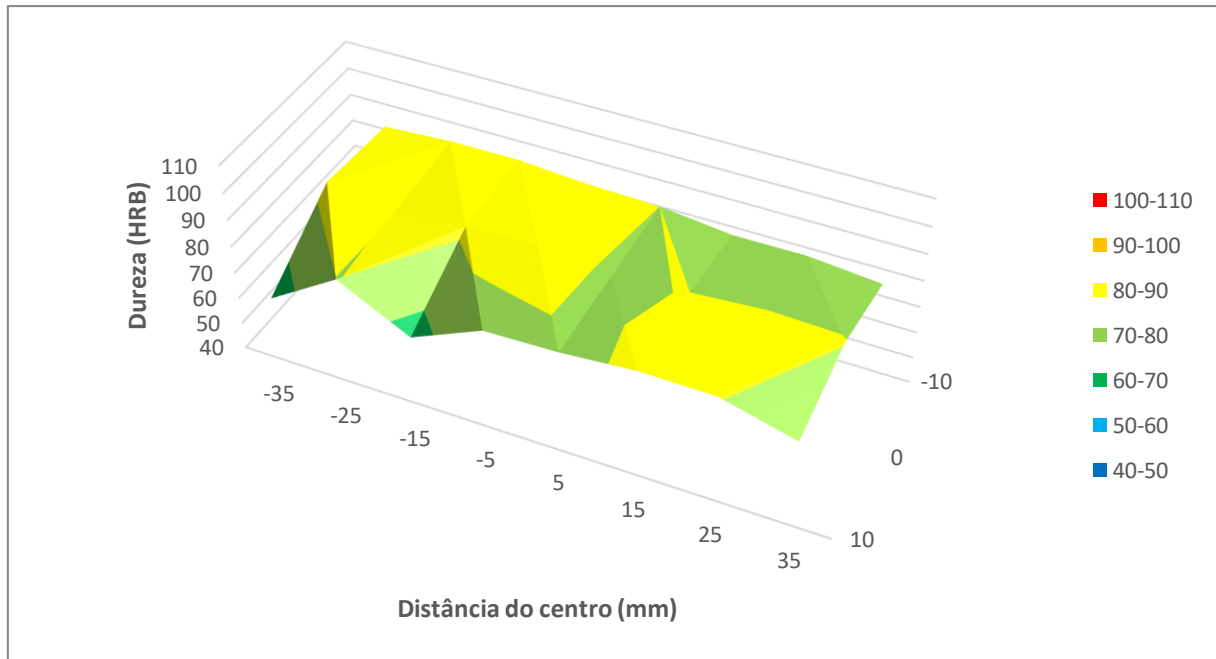
Figura 35 – Valores de dureza dos perfis em relação a distância do centro da amostra de material base.



Fonte: O Autor (2023)

Através da análise dos valores de dureza obtidos é possível constatar valor máximo registrado de 83,4 Rockwell B e mínimo de 64,1 Rockwell B, compreendendo um intervalo de 19,3 Rockwell B. A média de dureza calculada foi de 78,5 Rockwell B. Um gráfico de superfície contendo os três perfis de dureza obtidos da amostra é apresentado na Figura 36 com o objetivo de ilustrar a distribuição da dureza ao longo do intervalo analisado.

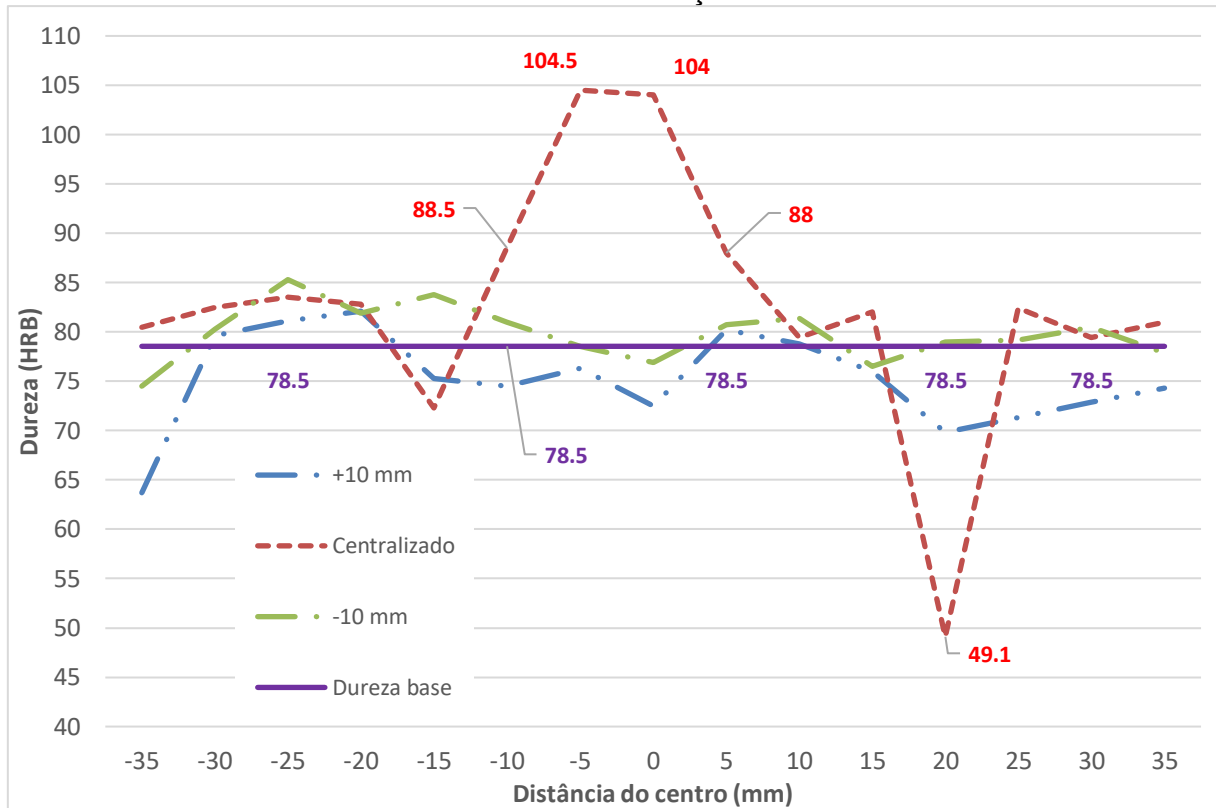
Figura 36 – Distribuição dos valores de dureza ao longo do intervalo de medição da amostra do material base.



Fonte: O Autor (2023)

As medidas de dureza foram realizadas na amostra obtida através da viga utilizada na primeira simulação, obedecendo aos parâmetros estabelecidos no capítulo anterior. O gráfico apresentado na Figura 37 apresenta os valores de dureza obtidos ao longo da seção transversal do componente na amostra.

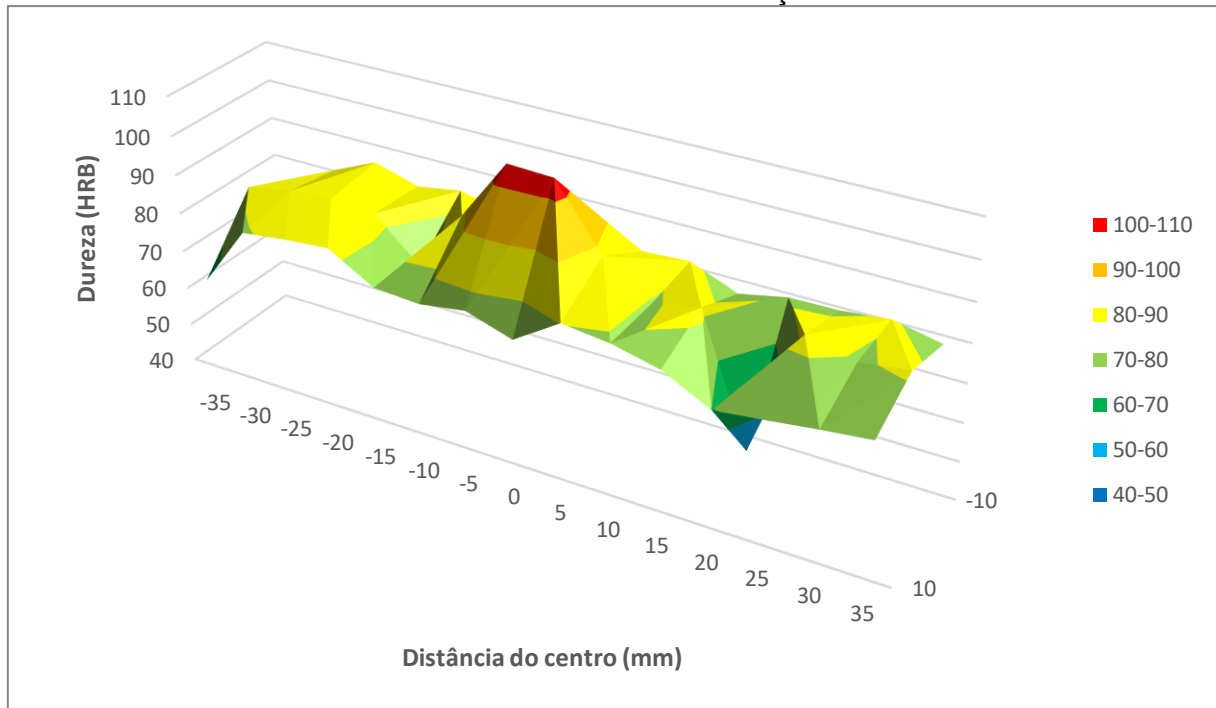
Figura 37 – Valores de dureza dos perfis em relação a distância do centro da amostra da simulação 01.



Fonte: O Autor (2023)

Através da análise dos valores de dureza obtidos é possível constatar valor máximo registrado de 104,5 Rockwell B e mínimo de 49,1 Rockwell B, compreendendo um intervalo de 55,4 Rockwell B. A média de dureza calculada foi de 79,2 Rockwell B. Gráficos de superfície e curvas de contorno contendo dados dos três perfis de dureza obtidos da amostra são apresentados na Figura 38 com o objetivo de ilustrar a distribuição da dureza ao longo do intervalo analisado. Os valores de pico do perfil centralizado foram obtidos na escala Rockwell C e convertidos para valores equivalentes na escala Rockwell B.

Figura 38 – Distribuição dos valores de dureza ao longo do intervalo de medição da amostra do material da simulação 01.

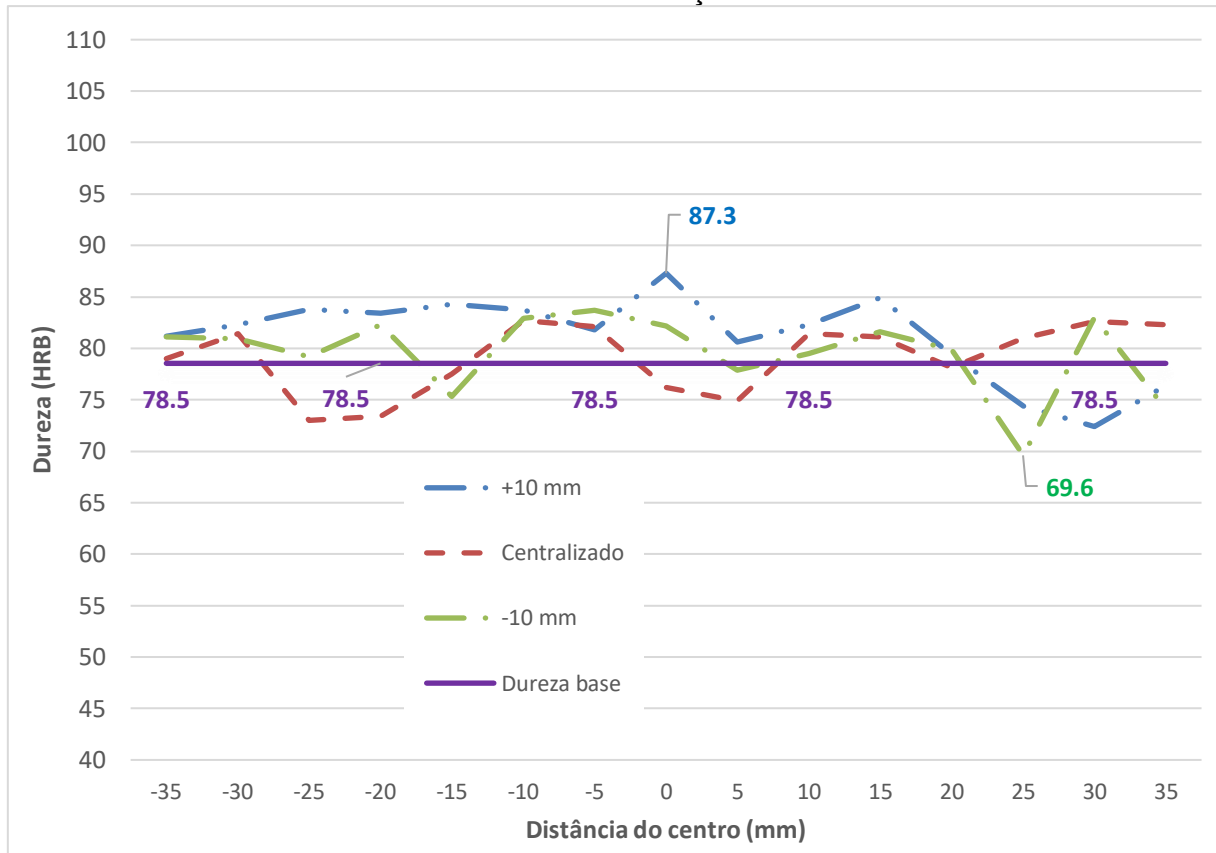


Fonte: O Autor (2023)

Através da análise dos gráficos apresentados é possível constatar valores de elevada dureza (em relação a dureza base do material) iguais a 29 Rockwell C (104,5 HRB) e 28,3 (104 HRC) registrados na região de incidência da chama na superfície. Os valores de 88,5 Rockwell B e 88 Rockwell B registrados adjacentes a estes primeiros, no mesmo perfil de dureza, apresentam desvio relevante em relação ao valor médio de dureza base do material. Uma inconsistência é apresentada no ponto onde o valor de dureza registrada foi igual a 49,1 Rockwell B, valor significativamente baixo em relação aos valores de dureza obtidos nas medições realizadas nas adjacências.

As medidas de dureza foram realizadas na amostra obtida através da viga utilizada na segunda simulação, obedecendo ao parâmetro estabelecido no capítulo anterior. O gráfico apresentado na Figura 39 apresenta os valores de dureza obtidos ao longo da seção transversal do componente na amostra.

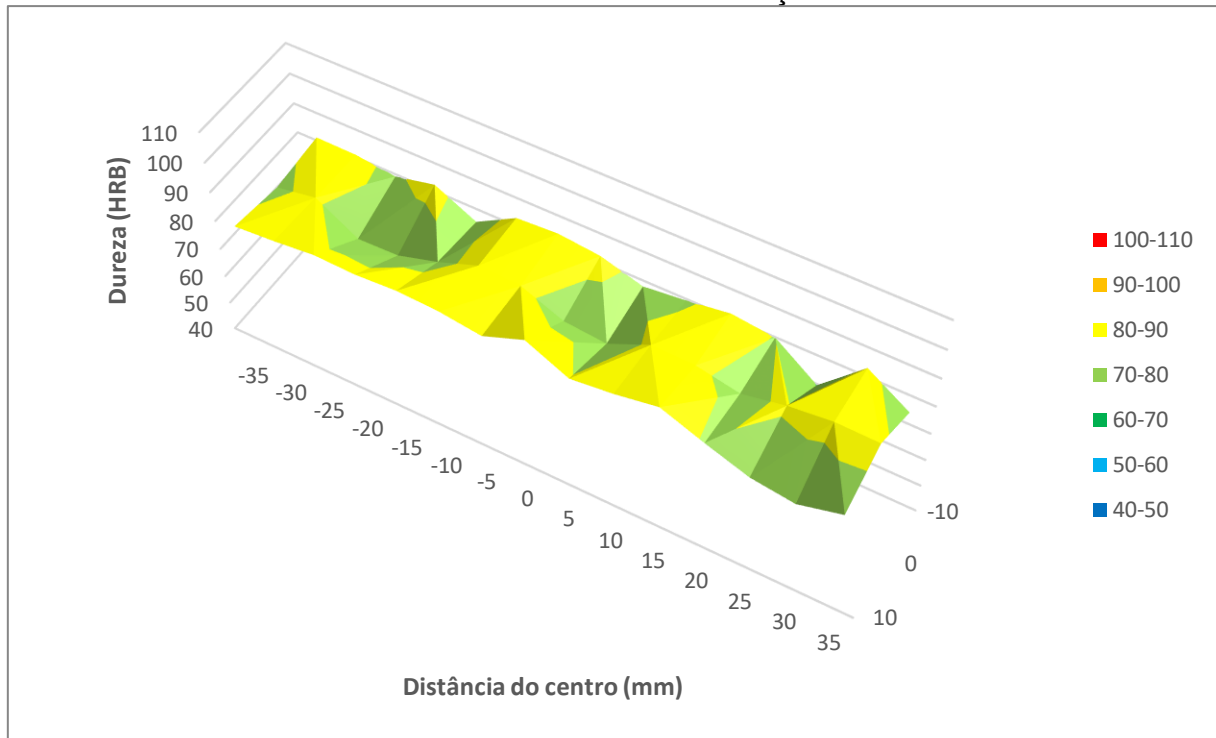
Figura 39 – Valores de dureza dos perfis em relação a distância do centro da amostra da simulação 02.



Fonte: O Autor (2023)

Através da análise dos valores de dureza obtidos é possível constatar valor máximo registrado de 87,3 Rockwell B e mínimo de 69,6 Rockwell B, compreendendo um intervalo de 17,7 Rockwell B. A média de dureza calculada foi de 80 Rockwell B. Gráficos de superfície e curvas de contorno contendo dados dos três perfis de dureza obtidos da amostra são apresentados na figura 40 com o objetivo de ilustrar a distribuição da dureza ao longo do intervalo analisado.

Figura 40 – Distribuição dos valores de dureza ao longo do intervalo de medição da amostra do material da simulação 02.



Fonte: O Autor (2023)

Através da análise dos gráficos apresentados é possível constatar uma distribuição mais homogênea dos valores de dureza no intervalo analisado, em relação aos dados apresentados na primeira simulação. Nesta simulação, embora o resfriamento tenha sido realizado de forma abrupta, diretamente sobre a superfície logo após a extinção da chama, não são apresentados valores pontuais alarmantes de dureza, como foi caso dos apresentados na primeira simulação. A obtenção de valores com menor desvio em relação a média de dureza do material base indica que não houve transformação de fase no material, ocorrendo no máximo efeitos de recuperação, uma vez que a temperatura máxima atingida não foi suficiente para gerar tais transformações.

Os valores de dureza de maior desvio em relação a dureza do material base obtidos na primeira simulação, levantam uma suspeita quanto a alteração microestrutural da região onde as medições foram realizadas. Nas regiões em que os valores de dureza apresentados foram mais altos, indica a ocorrência de uma austenitização do material levando a formação de uma microestrutura mais dura do

que o material original, mesmo tendo sido adotado o resfriamento não forçado. O menor valor de dureza foi obtido em um ponto específico, onde as medições realizadas na circunvizinhança apresentaram valores de menor desvio em relação a dureza do material base, o que denota um comportamento pontual anômalo. Para ambos os casos se faz necessária uma análise metalográfica da região com o objetivo de identificar uma possível morfologia microestrutural.

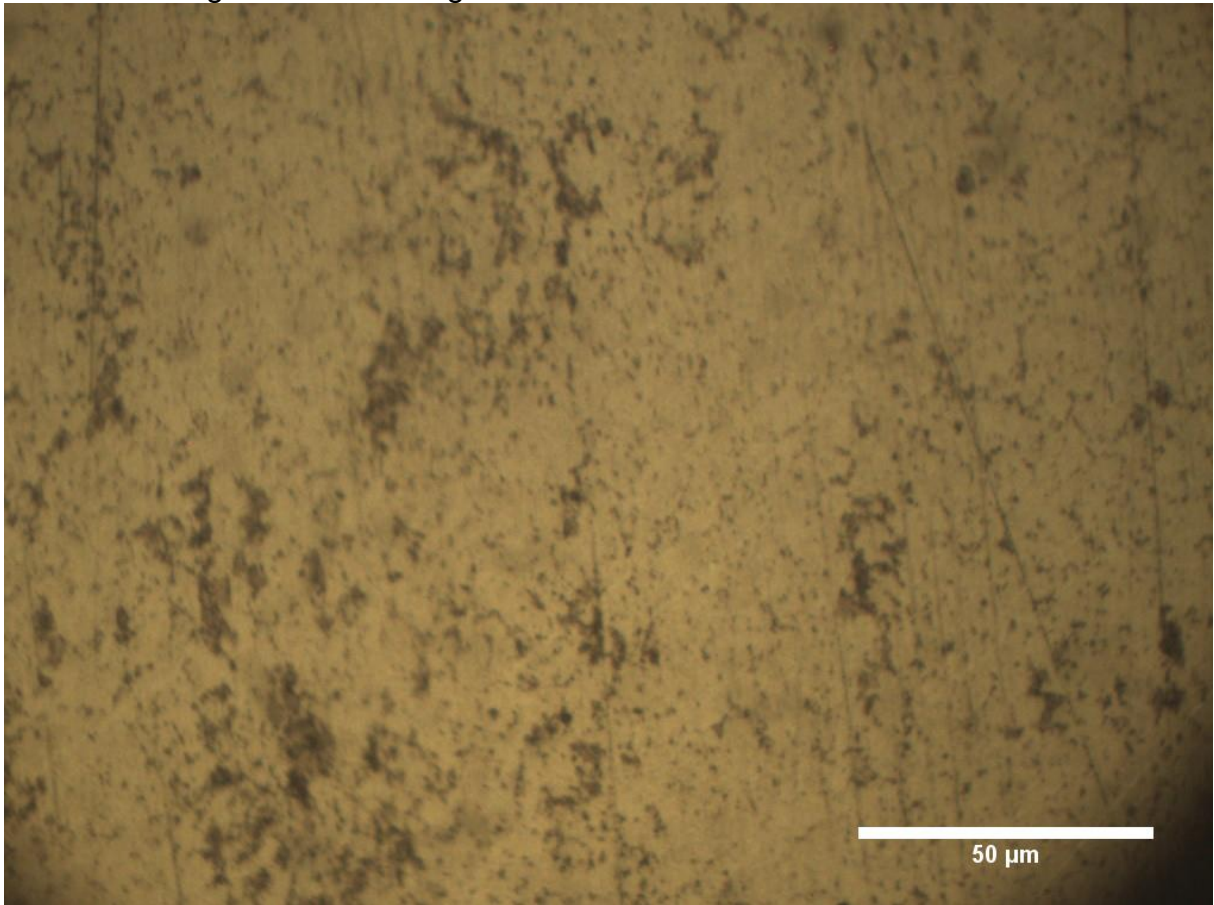
Os resultados dos valores dos perfis de dureza obtidos no ensaio são apresentados no apêndice B. Estes dados foram utilizados para elaboração dos gráficos de análise apresentados nessa seção.

5.3 Ensaio de metalografia

Pontos de medição que apresentam valores de dureza com grandes desvios em relação aos valores de dureza base do material, despertam preocupação com relação a alteração da microestrutura da região. Nestes casos se faz necessária uma análise microestrutural por meio de ensaio de metalografia com o objetivo de investigar a ocorrência de mudanças de fase no material. Inicialmente se propõe a análise da microestrutura do material base (não submetido ao tratamento térmico) com o objetivo de obter um parâmetro de comparação em relação as análises dos ensaios metalográficos realizados nas amostras dos perfis tratados.

A imagem obtida no ensaio metalográfico realizado na amostra do material base é ilustrada na Figura 41. Através da análise da microestrutura apresentada podem ser observadas estruturas perlíticas (regiões escuras) e ferríticas (regiões claras) coexistindo dispostas em uma configuração comum a aços de baixo teor de carbono (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2018).

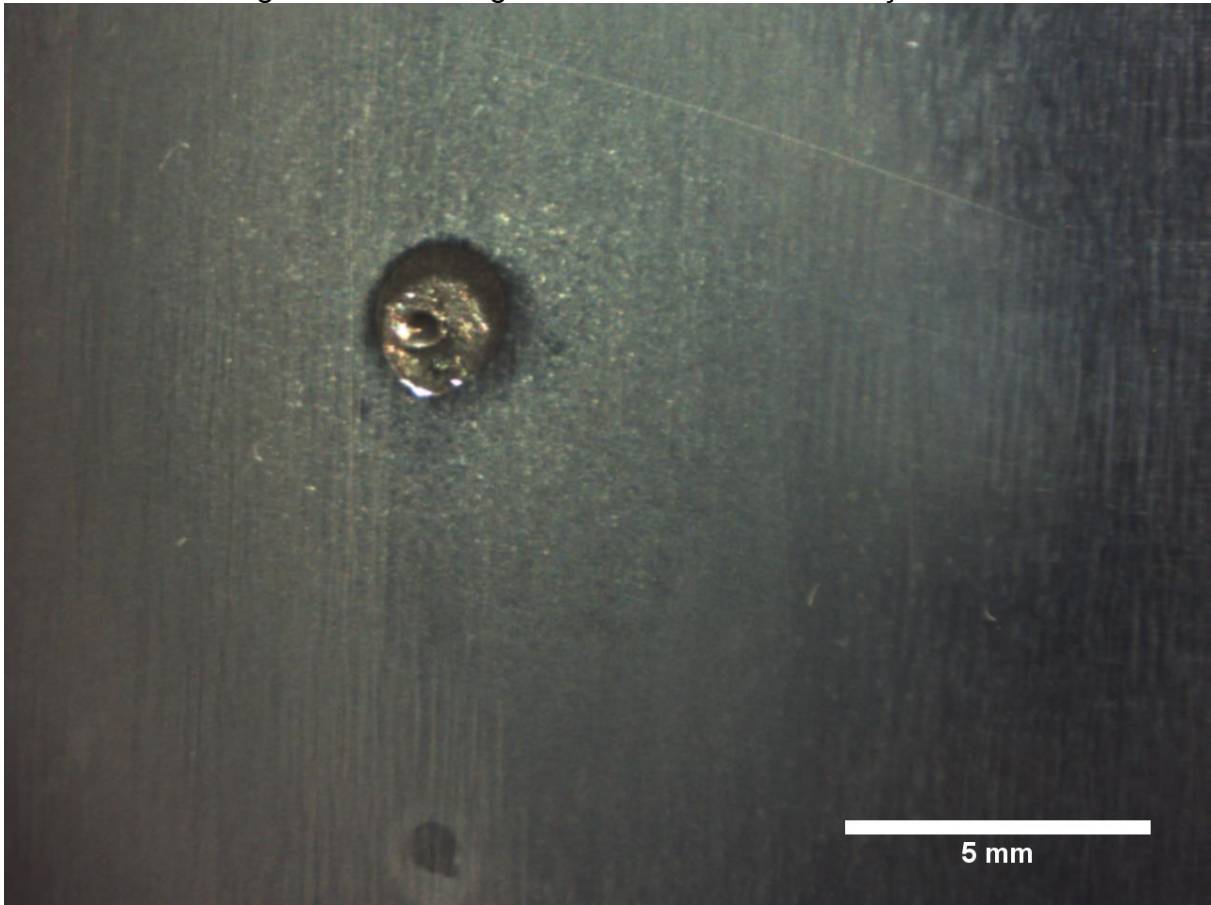
Figura 41 – Metalografia da microestrutura do material base.



Fonte: O Autor (2023)

Através da análise macroscópica da região de incidência da chama na amostra da primeira simulação é possível identificar regiões distintas. A região central onde é evidenciado o ponto em que houve fusão do material, uma região termicamente afetada, adjacente a esta poça de fusão, indicando a formação de uma nova microestrutura, uma região externa a esta distinta pela coloração mais clara em relação a coloração do material base e por fim o material base, identificado pela região externa mais escura.

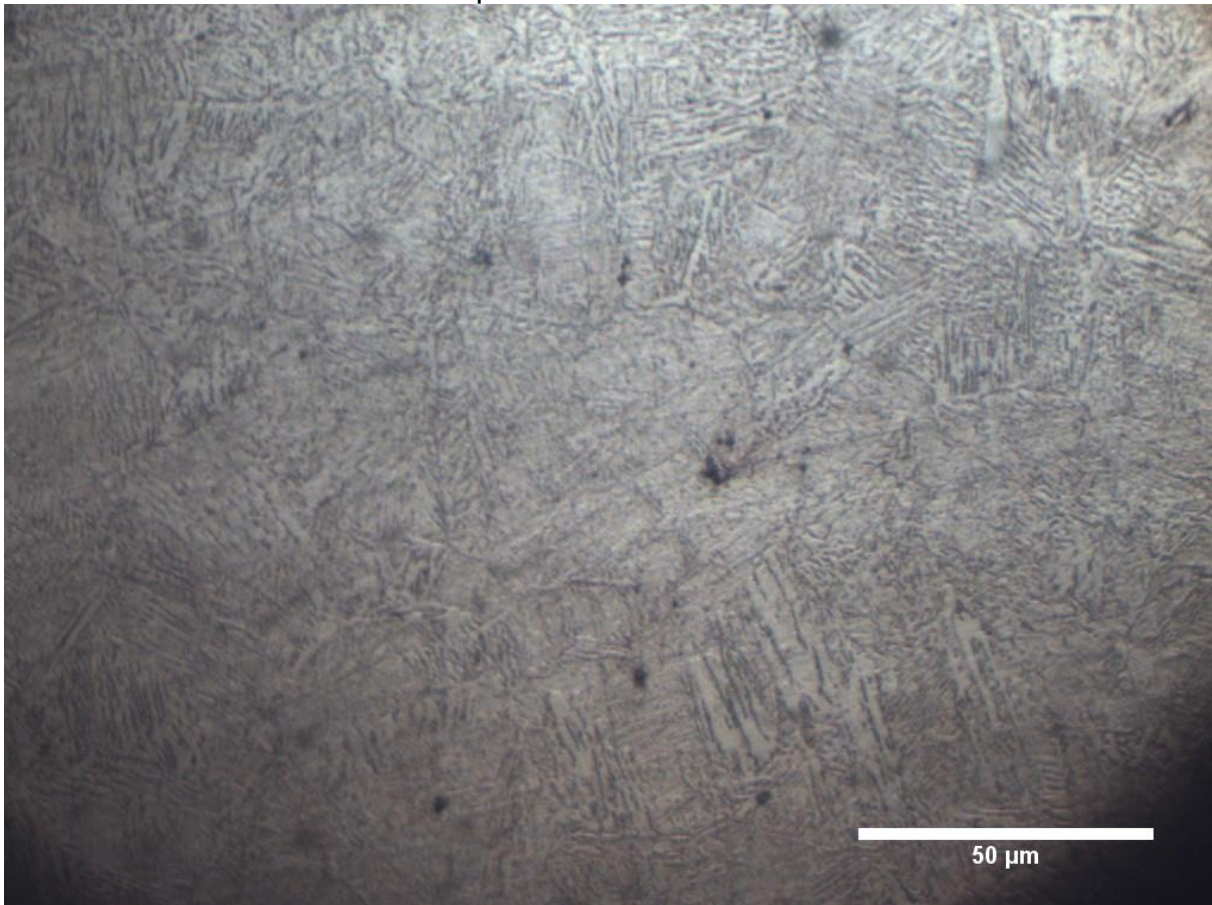
Figura 42 – Macrografia do material da simulação 01.



Fonte: O Autor (2023)

A estrutura observada na região próxima ao centro (Figura 43) é característica da formação de bainita superior em aços baixo carbono, onde coexistem as fases ferrita em forma de placas orientadas como “feixes” dispostos em formato de agulhas e carbonetos (geralmente a fase cementita). A formação de bainita superior nesta região evidencia a suspeita levantada nos ensaios de dureza acerca da mudança de fase sofrida pelo material, neste caso a formação deste microconstituente, neste arranjo estrutural, configura aquecimento do material a uma temperatura suficiente para que ocorra a austenitização sendo adotado resfriamento moderado (SILVA, 2020).

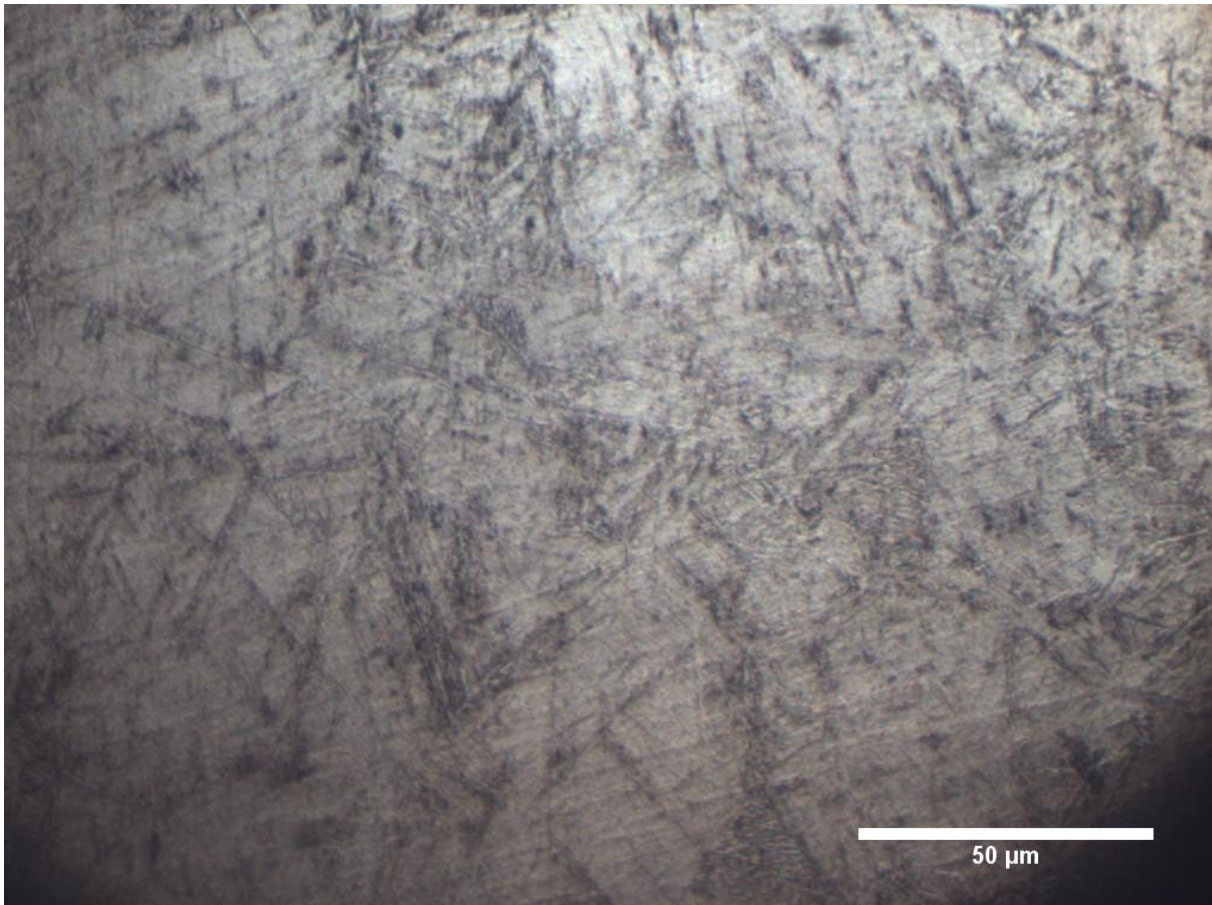
Figura 43 – Metalografia da microestrutura do material da simulação 01: Região próxima ao centro.



Fonte: O Autor (2023)

A estrutura observada na região intermediária (Figura 44) é característica da formação do microconstituente bainita inferior coexistindo com a fase ferrita para aços baixo carbono. Na bainita inferior estão presentes as fases ferrita em forma de placas orientadas como “feixes” dispostos em formato de agulha e carbonetos (geralmente a fase cementita). A orientação do sentido dos feixes de ferrita na bainita inferior é bastante aleatória quando comparada a orientação usual a qual estes feixes se formam na bainita superior. A bainita inferior é obtida por meio do aquecimento do material a uma temperatura suficiente para que ocorra a austenitização, porém se forma a temperaturas mais baixas do que as temperaturas as quais a bainita superior é formada (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2018).

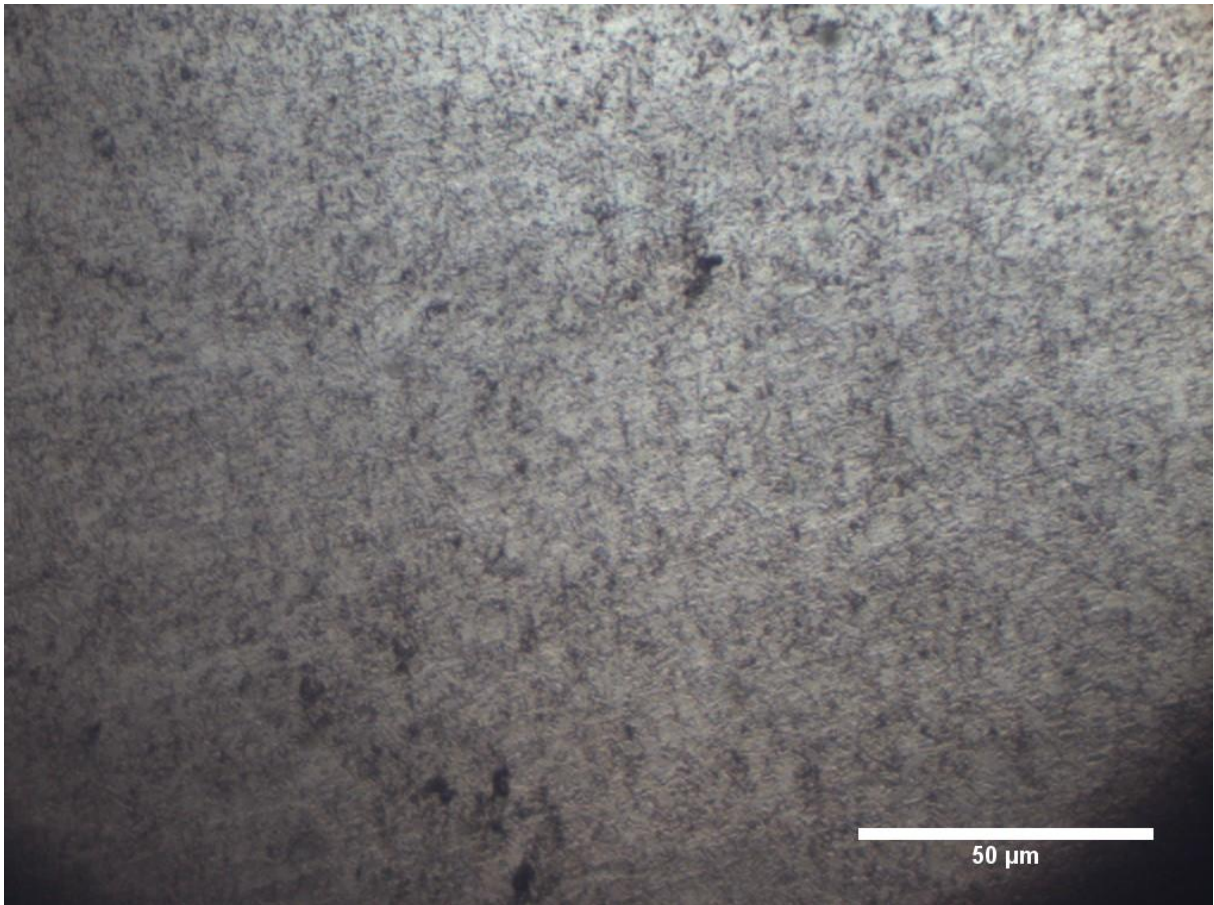
Figura 44 – Metalografia da microestrutura do material da simulação 01: Região intermediária.



Fonte: O Autor (2023)

A estrutura observada na região externa (Figura 45) é similar a estrutura do material base, apresentando microconstituintes perlíticos (regiões escuras) e estruturas ferríticas (regiões claras) coexistentes. A divergência observada nesta região em comparação a análise metalográfica do material base é dada em relação ao tamanho dos grãos das fases. Materiais de menor granulação apresentam, de maneira geral, maiores valores de dureza e resistência quando comparados a materiais de maior granulação constituídos pelas mesmas fases (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2018).

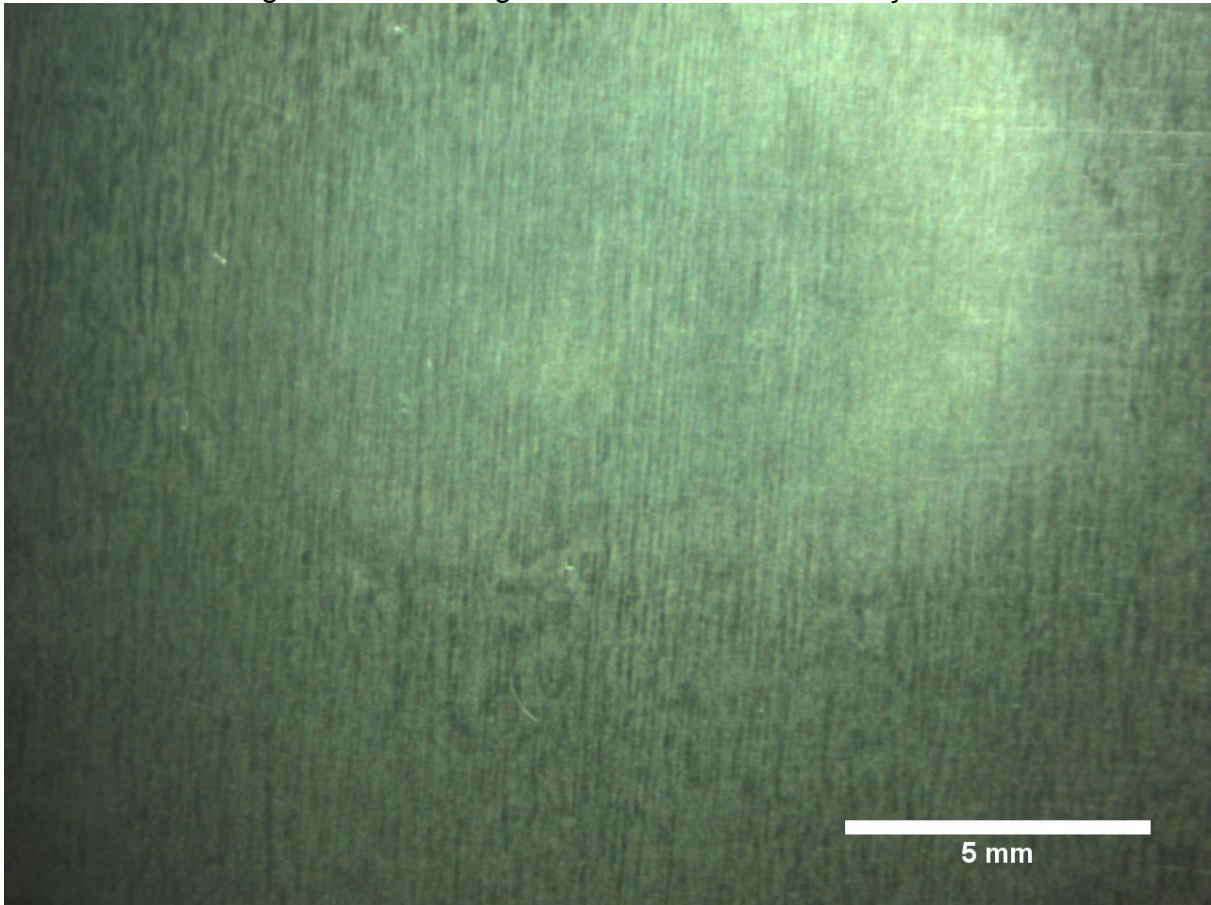
Figura 45 – Metalografia da microestrutura do material da simulação 01: Região externa.



Fonte: O Autor (2023)

Através da análise macroscópica da região de incidência da chama na amostra da segunda simulação (Figura 46) é possível identificar uma região distinta no ponto em que houve incidência da chama. Esta região se distingue por apresentar coloração mais clara em relação a coloração do material base.

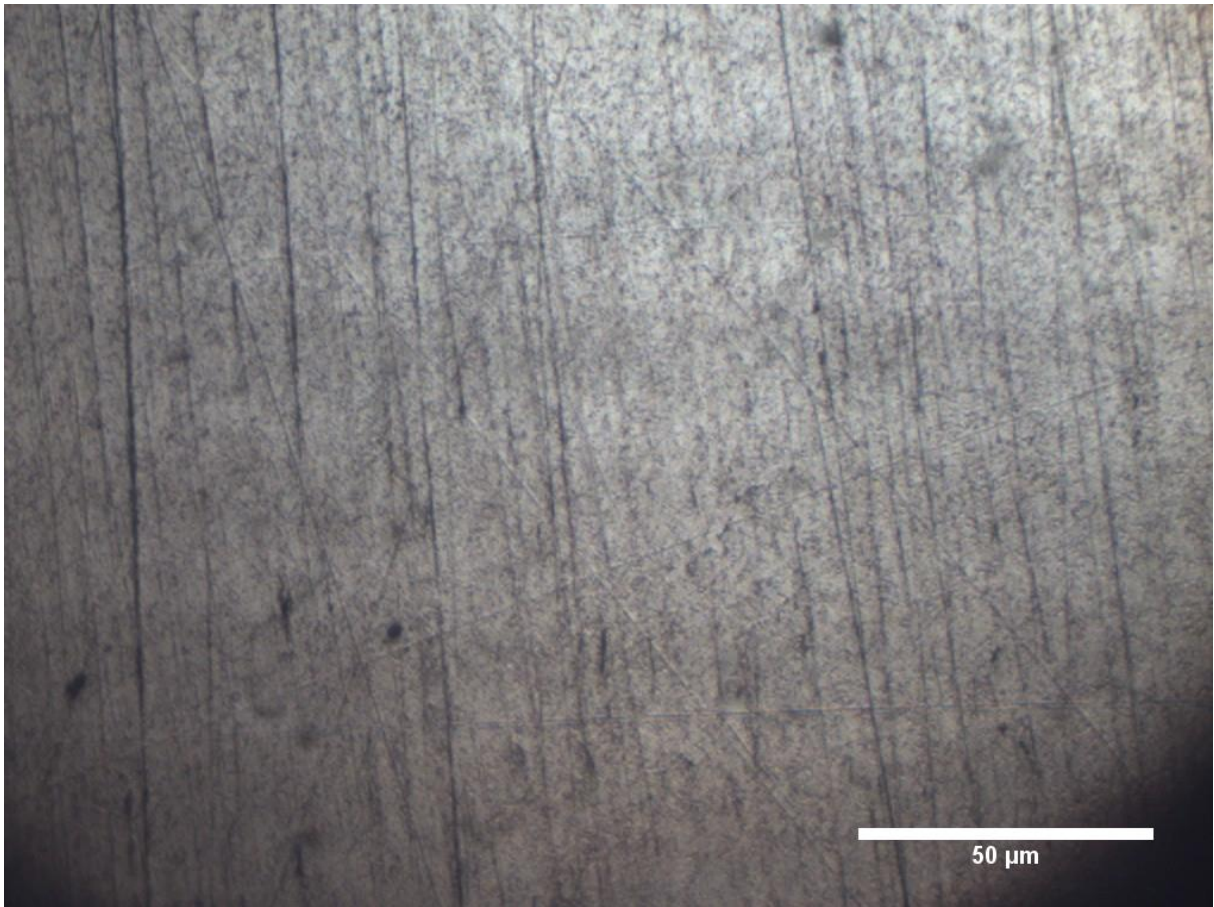
Figura 46 – Macrografia do material da simulação 02



Fonte: O Autor (2023)

A microestrutura observada na região central da amostra da simulação 02 (Figura 45) é bastante similar a estrutura do material base, apresentando microconstituintes perlíticos (regiões escuras) e estruturas ferríticas (regiões claras) coexistentes. Com relação ao tamanho dos grãos, não se nota uma divergência significativa de tamanho de grão das fases presentes nesta análise em comparação aos tamanhos de grão das fases do material base, porém se observa uma fração maior da fase ferrítica em relação a fração de perlita volumétrica total.

Figura 47 – Metalografia da microestrutura do material da simulação 02: Região central



Fonte: O Autor (2023)

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado um estudo acerca dos aços patináveis abordando o início da utilização deste material na indústria da construção civil, os tipos de estrutura aos quais ele é comumente empregado e as propriedades gerais desta classe de aços. Em seguida, o estudo foi direcionado ao processo produtivo de componentes estruturais, focando em componentes estruturais compostos pelo processo de soldagem a arco elétrico. Os efeitos indesejados do processo de soldagem foram abordados na sequência, sendo por fim apresentado o processo de correção de distorções através do desempenho por chama. O embasamento teórico obtido através deste estudo foi de suma importância para a realização dos ciclos térmicos de simulação de desempenho e os procedimentos de análise posteriormente realizados.

Algumas conclusões importantes foram realizadas a partir da execução dos ciclos térmicos de simulação de desempenho. Através da análise dos gráficos de curvas de aquecimento apresentados é possível constatar a divergência do potencial calorífico da chama utilizada na primeira simulação em relação ao potencial calorífico da chama utilizada segunda simulação. Embora o ajuste tenha sido feito com os mesmos parâmetros de vazão de saída nos cilindros e tenha sido alcançada uma configuração de chama bastante similar a primeira, em critérios visuais, o levantamento das curvas de aquecimento e o cálculo das taxas médias de aquecimento provaram tal divergência.

Estes dados levantam a suspeita de que o ponto da superfície onde houve incidência direta da chama tenha atingido valores de temperatura superiores a 650°C, confrontando os parâmetros de operação de desempenho por chama estabelecidos na norma CEN/TR 10347 da comissão europeia de regulamentação e afirmados por Schäfer *et al.* (2010) em seu estudo. Neste caso se faz necessário o monitoramento da temperatura da superfície, onde a chama incide, através de equipamentos como pirômetros, sensores ópticos de medição de precisão de temperatura e câmeras térmicas.

Quanto ao resfriamento, cada ciclo foi realizado em um regime diferente. Em sua concepção, o segundo ciclo térmico de simulação de desempenho tinha por

premissa a realização do resfriamento forçado, com os mesmos parâmetros aos quais foi realizado, no momento em que o sensor termopar mais próximo a fonte de calor registrasse uma temperatura superior a 650°C. Ao se constatar o comportamento tendencioso da curva a permanência em uma intervalo de valores de temperatura, consideravelmente inferior ao valor desejado, se decidiu pela extinção da chama mantendo a execução do método de resfriamento proposto.

Quanto as medições de dureza realizadas nas amostras, os perfis de dureza do material base obtidos antes do processo de aquecimento foram realizados com o objetivo de servir como parâmetro comparativo de para os demais perfis analisados. A análise dos dados dos perfis de dureza da amostra obtida da seção de viga utilizada na primeira simulação, apresentou na região de incidência da chama valores de dureza elevados em comparação aos valores do material base. Ainda nesta amostra, um valor baixo de dureza (comparado aos valores de dureza do material base) foi registrado em um ponto específico, destoando das medições realizadas em sua circunvizinhança. Tanto os valores elevados, quanto o valor baixo (em comparação aos valores de dureza do material base) despertam preocupação quanto a alterações microestruturais e de propriedades mecânicas nestes pontos.

As medições de dureza obtidas através da amostra da seção de viga utilizada na segunda simulação apresentam valores de desvio máximo igual a 8,9 HRB em relação ao valor de dureza do material base, enquanto o valor de máximo desvio apresentado na primeira simulação foi de 26 HRB. Deste modo é possível concluir em um determinado intervalo de temperatura de operação para o processo de desempenho por chama, o resfriamento forçado por água não tem impacto relevante sobre as propriedades do material.

Os ensaios metalográficos realizados foram fundamentais na investigação da alteração da microestrutura nas regiões que apresentaram valores de dureza com alto desvio em relação aos valores de dureza padrão do material. Através da análise das imagens obtidas nos ensaios realizados para a amostra da primeira simulação foi possível identificar diferentes morfologias no material. Em uma primeira investigação foi possível constatar a austenitização do material na região de incidência da chama e através da análise metalográfica se constatou a formação da bainita superior na região. Em seguida a investigação se estendeu a região termicamente afetada, na

qual através da análise das imagens capturadas foi possível constatar a austenitização da região e a formação da bainita inferior. Uma última análise foi realizada na região mais externa, que apresentou coloração divergente ao material base na análise macrográfica, e nela não foi constatada mudança de fase, mas sim transformação de fase relativa ao tamanho dos grãos. Através da análise das imagens capturadas dos ensaios realizados para a amostra da segunda simulação, não foi possível identificar uma mudança de fases, mas sim uma alteração na fração da concentração volumétrica dos microconstituintes em relação ao material base.

7 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de dar continuidade e melhorar este trabalho são sugeridas as seguintes propostas futuras:

- Realizar metalografias mais detalhadas nas regiões de interesse;
- Realizar uma nova simulação física dos ciclos térmicos de desempenho utilizando dispositivos de ignição de chama mais potentes;
- Analisar a incidência de tensões residuais nos perfis tratados através do método de seccionamento;
- Analisar a incidência de tensões residuais nos perfis tratados através do método do furo, por meio da instalação superficial de extensômetros tipo roseta.

REFERÊNCIAS

AFONSO, Inês S; MARTIN, Manuel Rodriguez; RIBEIRO; João E. **Effect of Welding Sequence in Angular Distortion on Butt Joint GMAW Process**. 2022. 14 f. Curso de Engenharia Mecânica, Department Of Mechanical Technology, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2022.

ALBRECHT, Pedro; NAEMI, A.H. **Performance of Weathering Steel in Bridges**. Washington, D.C: Transportation Research Board National, 1984. 164 p.

ALPSTEN, G.A.; L.TALL. Residual Stresses in Heavy Welded Shapes. **Welding Research Supplement**. Nova Iorque, p. 93-105. maio 1970.

AMARINE. **Groove Design & Bevel Preparation**. Disponível em: <https://amarineblog.com/2019/09/05/groove-design-bevel-preparation/>. Acesso em: 05 nov. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5008**: Bobinas e chapas grossas laminadas a quente, de aço de baixa liga e alta resistência, resistentes à corrosão atmosférica, para uso estrutural — Requisitos. 3 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2015. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5884**: Perfil I estrutural de aço soldado por arco elétrico - Requisitos gerais. Rio de Janeiro: Abnt, 2013. 33 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8300**: Chapas Grossas de Aço carbono para uso geral. 2 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2016. 6 p.

Avent.R.R. **Guide for Heat-Straightening of Damaged Steel Bridge Members**. Washington, D.C: Federal Highway Administration (U.s.), 2008. 77 p.

BOC LIMITED, 2023, Inglaterra. **Fundamentals of Flame Straightening**. Inglaterra: Linde, 2023. 32 p.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2018. 1014 p.

Centro Brasileiro de Construção em Aço. **Cenário dos fabricantes de Estruturas de Aço 2022**. 2022. Disponível em: <https://www.cbca-acobrasil.org.br/site/biblioteca/>. Acesso em: 25 ago. 2023.

CHICAGO ARCHITECTURE CENTRE (Chicago). **Richard J. Daley Center**. Disponível em: <https://www.architecture.org/learn/resources/buildings-of-chicago/building/richard-j-daley-center/>. Acesso em: 05 out. 2023.

CORDEIRO, Filipe David Santos. **A Critical Analysis on Weld's Distortion**. 2015. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências e Tecnologia, Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2015.

COSTA, Adalto Verneck. **Soldabilidade de um aço patinável de alto silício para construção metálica com resistência extra à corrosão em atmosfera marinha**. 2019. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Minas, Metalurgia Física, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

CREMONA, Christian; EICHLER, B; JOHANSON, B. Improved Assessment Methods for Static and Fatigue Resistance of Old Steel Railway Bridges. **Journal Of Bridge Engineering**. Paris, p. 1-218. nov. 2007.

DOGAN, Ezgi; MUSTAFA, Ay; KURTULMUS, Memduh; YUKLER, Ahmet Irfan; ETYEMEZ, Ayham. **Effects of welding parameters on the angular distortion of welded steel plates**. 2022. 7 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Mecânica, Marmara University Institute Of Pure And Applied Science, Istanbul, 2022.

ELPROCUS. **Induction Heating Principle and It's Applications**. Disponível em: <https://www.elprocus.com/induction-heating-principle-and-its-applications/>. Acesso em: 16 nov. 2023.

FAM CONSTRUÇÕES METÁLICAS PESADAS (São Paulo). **Perfil Soldado: abreviaturas e propriedades**. Abreviaturas e propriedades. 2023. Disponível em: <http://perfilsoldado.com.br/perfis-soldados-vigas-soldadas-catalogo-tabelas-serie-vs-cvs-cs-vsm-ps-i-h-t-caixao/>. Acesso em: 15 out. 2023.

FALEIROS, João Paulo Martin; TEIXEIRA JUNIOR, Job Rodrigues; SANTANA, Bruno Marques. **O crescimento da indústria brasileira de estruturas metálicas e o boom da construção civil: um panorama do período 2001-2010**. 2011. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/?locale=pt_BR. Acesso em: 23 ago. 2023.

FORESTELL, Kevin. **The Bessemer Process: What It Is and How It Changed History**. 2021. Disponível em: <https://dozr.com/blog/bessemer-process>. Acesso em: 12 out. 2023.

GENTIL, Vincente. **Corrosão**. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1996. 373 p.

GEOLOGIA E METALURGIA. São Paulo: Centro Moraes Rego, n. 11, 1955. Anual.

GHOSH, Ahindra; CHATTERJEE, Amit. **IRONMAKING AND STEELMAKING: theory and practice**. 3. ed. Nova Delhi: Phi Learning Private Limited, 2008. 472 p.

GOVERNO DA CIDADE DE CHICAGO (Chicago). Governo Municipal. **The Picasso**. 2023. Disponível em:

https://www.chicago.gov/city/en/depts/dca/supp_info/chicago_s_publicartthepicassou ntitledsculpture.html. Acesso em: 22 set. 2023.

GUARNIER, Christiane Roberta Fernandes. **METODOLOGIAS DE DETALHAMENTO DE ESTRUTURAS METÁLICAS**. 2009. 399 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

HELENE, Paulo Roberto do Lago. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. 231 f. Tese (Livre docência) - Curso de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo Escola Politécnica, São Paulo, 1993. Disponível em: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/TD1.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2023.

HISTÓRIA, Ensinar. **Inauguração da Torre Eiffel, Paris, França**. Disponível em: <https://ensinarhistoria.com.br/linha-do-tempo/inauguracao-da-torre-eiffel/>. Acesso em: 08 out. 2023.

LAPORTA NETO, Dante Gageiro; ARNALDO, Ruben Gonzalez; MAZZAFERRO; José Antônio Esmeiro. **Análise da Influência da Espessura de Aba, Espessura de Alma e Energia de Soldagem sobre as Distorções Angulares em Juntas em Ângulo de Filete**. 2017. 20 f. Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

LORENZO, Gianmaria di; FORMISANO, Antonio; LANDOLFO; Rafaelle. On the Origin of I Beams and Quick Analysis on the Structural Efficiency of Hot-rolled Steel Members. **The Open Civil Engineering Journal**. Naples, p. 332-343. maio 2016.

LUCÍA, Oscar; MAUSSION, Pascal; DEDE, Enrique J; BURDIO, José M. Induction Heating Technology and Its Applications: Past Developments, Current Technology, and Future Challenges. **Ieee Transactions On Industrial Electronics**. Nova Iorque, p. 2509-2520. 10 set. 2013.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo J; BRACARENSE; Alexandre Queiroz. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: Ufmg, 2011. 362 p.

MODENESI, Paulo J; MARQUES, Paulo Villani; SANTOS; Dgobeto B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. 2012. 209 f. Curso de Engenharia Metalúrgica, Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

NATIONAL STEEL BRIDGE ALLIANCE (Chicago). **Burro Creek Canyon Bridge**. Disponível em: <https://www.aisc.org/nsba/prize-bridge-awards/prize-bridge-winners/burro-creek-canyon-bridge/>. Acesso em: 10 out. 2023.

NAVARRO, Rômulo Feitosa. A Evolução dos Materiais: parte1 da pré-história ao início da era moderna. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, Campina Grande-Pb, v. 11, n. 1, p. 1-11, jun. 2006. Disponível em:

<http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/view/6>. Acesso em: 25 set. 2023.

NOVUS. **Data Logger Industrial Multicanais FieldLogger**. 2023. Disponível em: <https://www.novus.com.br/pt/produto/data-loggers/fieldlogger>. Acesso em: 19 out. 2023.

OLIVEIRA, Iara Gripp. **CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURAIS DO FERRO PUDLADO**. 2021. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2021.

PANNONI, Fabio Domingos. **HISTÓRIA, COMPORTAMENTO E USOS DOS AÇOS PATINÁVEIS NA ENGENHARIA ESTRUTURAL BRASILEIRA**. 2004.

Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/265893820_HISTORIA_COMPORTAMENTO_E_USOS_DOS_ACOS_PATINAVEIS_NA_ENGENHARIA_ESTRUTURAL_BRASILEIRA. Acesso em: 05 out. 2023.

PANNONI, Fábio Domingos. **PRINCÍPIOS DA PROTEÇÃO DE ESTRUTURAS METÁLICAS EM SITUAÇÃO DE CORROSÃO E INCÊNDIO**. 6. ed. Ouro Branco: Gerdau Açominas, 2015. 100 p.

PANNONI, Fabio Domingos. **Os Versáteis Aços Patináveis**. Ouro Branco: Gerdau Açominas, 2011. Disponível em: <https://www.abcem.org.br/site/biblioteca-digital>. Acesso em: 22 ago. 2023.

PORTES, Cleyton Précoma. **Patologia em Estruturas Metálicas**: estudo de caso em torres de linha de transmissão. 2022. 34 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Unisociesc, Joinvile, 2022.

PERNETA, Hugo; CORREIA; M. J; BAPTISTA, Antônio M.; SALTA, Manuela M. **REPARAÇÃO DE ESTRUTURAS METÁLICAS**. 2010. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/268521870_Reparacao_de_estruturas_metalicas. Acesso em: 05 out. 2023.

ROSSI, Alexandre. **FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO E DISTORÇÃO DA ALMA EM VIGAS DE PERFIS I METÁLICOS DUPLAMENTE SIMÉTRICOS**. 2018. 237 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2018.

SCHÄFER, D; Rinaldi, V., Beg, D. **Optimisation and improvement of the flame straightening process**. Bruxelas: European Commission, 2010.

SILVA, Jorge Alexandre. **Tratamentos térmicos dos aços**: uma abordagem ao mundo dos tratamentos térmicos. Porto: Quântica, 2020. 282 p.

SILVA, Valdir Pignatta e. **DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE AÇO**. 2012. 150 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia de

Estruturas e Geotécnica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

SHIP STRUCTURE COMMITTEE. **FLAME STRAIGHTENING AND ITS EFFECT ON BASE METAL PROPERTIES**. Washington, D.C: Ssc, 1969.

SOARES, Hélio Coelho Guimarães. **ESTUDO DE SEQÜÊNCIAS DE SOLDAGEM PARA REDUÇÃO E ELIMINAÇÃO DE DISTORÇÕES**. 2006. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

SOUL, Farag; HAMDY, Nada. Numerical Simulation of Residual Stress and Strain Behavior After Temperature Modification. In: SOUL, Farag; HAMDY, Nada. **Welding Processes**. Dallas: Radovan Kovacevic, 2012. Cap. 10. p. 218-245.

SOUZA JÚNIOR, Adalberto Calazans de. **ESTUDO DO ESTÁGIO INICIAL DA FORMAÇÃO DE PÁTINA EM AÇOS PATINÁVEIS EXPOSTOS EM AMBIENTE MARINHO**. 2021. 73 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e Materiais, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2021.

SOUZA, Vicente Custódio Moreira de; RIPPER, Thomaz. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini Ltda., 1998. 255 p.

TEBEDGE, N; ALPSTEN, G.A.; L.TALL. Residual-stress measurement by the sectioning method. **Experimental Mechanics**, Nova Iorque, v. 1, n. 13, p. 88-96, fev. 1973. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02322389>. Acesso em: 09 nov. 2023.

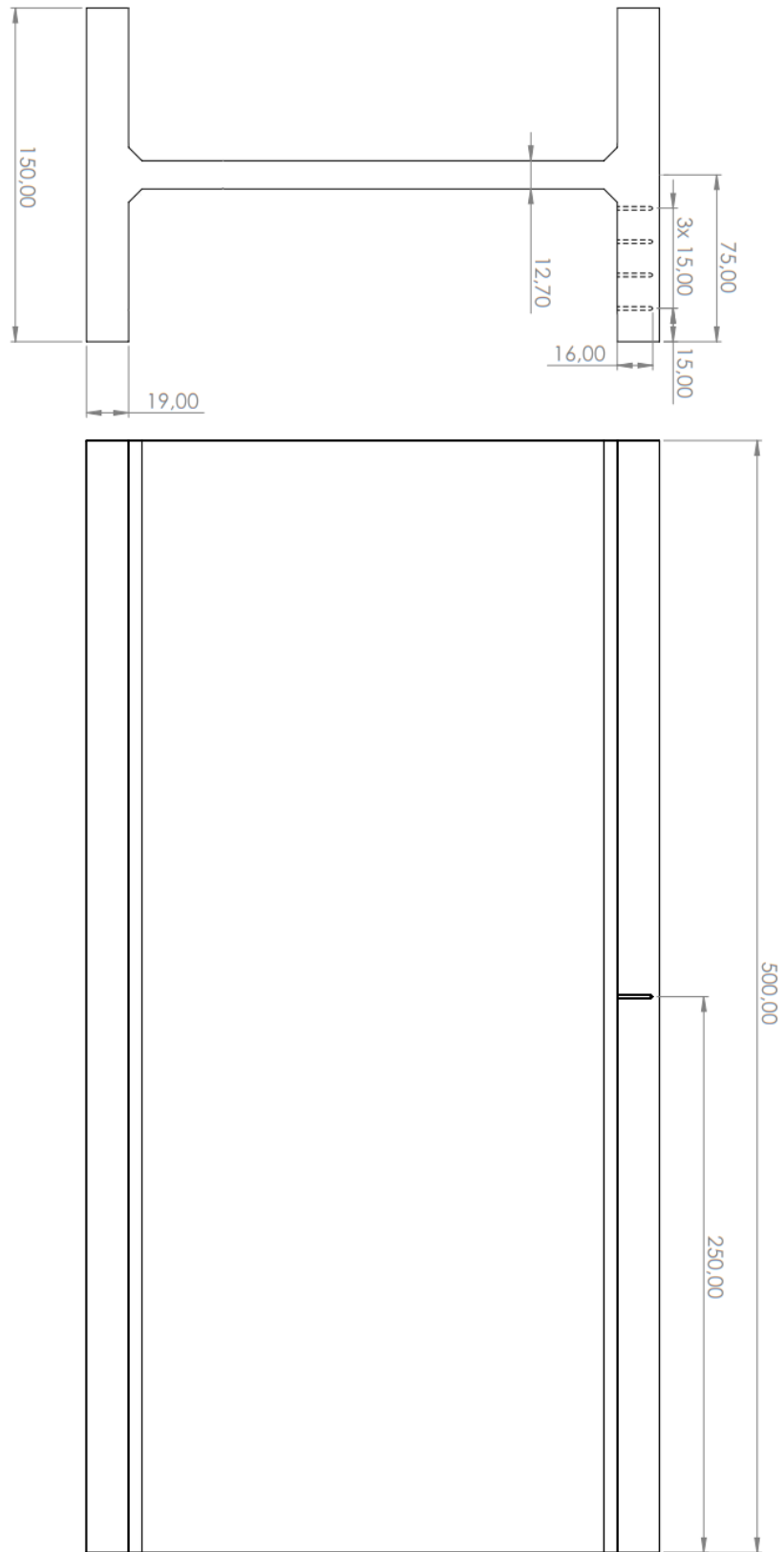
TECHNICAL COMMITTEE ECISS/TC. **CEN/TR 10347**: Guidance for forming of structural steels in processing. 10 ed. Bruxelas: Ecs, 2006. 9 p.

TRAVASSOS, Sandra de Jesus Barradas. **Estudo da evolução da camada de pátina em chapas de aços patináveis ASTM A242 e obras de arte expostas à atmosfera de São Paulo**. 2020. 183 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Ciências, Universidade de São Paulo Escola Politécnica, São Paulo, 2020.

TWI. **Distortion - corrective techniques**. 2023. Disponível em: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/distortion-corrective-techniques-037>. Acesso em: 15 nov. 2023.

VERDE, Salvatore. **TÉCNICAS DE MINIMIZAÇÃO DE DISTORÇÕES INDUZIDAS POR SOLDAGEM**. 2014. 110 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia de Soldagem, Faculdade de Tecnologia Senai Cimatec, Salvador, 2014.

APÊNDICE A – Configuração da furação para instalação dos termopares



Fonte: Própria (2023)

APÊNDICE B – Resultados dos perfis de dureza obtidos nos ensaios

Distância do centro (mm)	Valores de dureza Rockwell B (HRB)														
	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35
Material base - Perfil deslocado 10 mm	81,1	-	82,6	-	82,7	-	80,8	-	80	-	76,9	-	77	-	74,5
Material base - Centralizado	83,4	-	80,1	-	81,9	-	82,8	-	79,1	-	80,2	-	80,4	-	80,3
Material base - Perfil deslocado -10 mm	64,1	-	79,9	-	66,3	-	77,8	-	78,6	-	80,8	-	80,5	-	73,2
Dureza média do material base	78,5	78,5	78,5	78,5	78,5	78,5	78,5	78,5	78,5	78,5	78,5	78,5	78,5	78,5	78,5
Simulação 01 - Perfil deslocado + 10 mm	63,7	79,6	81,1	82,1	75,3	74,5	76,3	72,5	80,2	78,8	76	69,8	71,3	72,9	74,3
Simulação 01 - Centralizado	80,5	82,5	83,5	82,8	72,3	88,5	104,5*	104*	88	79,4	82	49,1	82,4	79,4	81
Simulação 01 - Perfil deslocado - 10 mm	74,5	80,3	85,3	81,9	83,8	81	78,5	76,9	80,7	81,4	76,5	79	79,2	80,5	77,9
Dureza média do material simulação 01	79,2	79,2	79,2	79,2	79,2	79,2	79,2	79,2	79,2	79,2	79,2	79,2	79,2	79,2	79,2
Simulação 02 - Perfil deslocado + 10 mm	81,2	82,3	83,8	83,4	84,3	83,7	81,8	87,3	80,6	82,3	84,9	79,4	74,4	72,4	76,4
Simulação 02 - Centralizado	79	81,4	73	73,4	77,5	82,7	82,1	76,2	74,9	81,4	81,1	78,1	81	82,6	82,3
Simulação 02 - Perfil deslocado - 10 mm	81,1	80,9	79,2	82,3	75,3	82,9	83,7	82,2	77,9	79,5	81,6	79,9	69,6	83	74,1
Dureza média do material simulação 02	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80

Observação (*): Valores obtidos em escala Rockwell C e convertidos para escala Rockwell B.

Fonte: Própria (2023)