



**I Curso de Especialização em Engenharia da Soldagem
Turma 2011 - CTA DEMEC-TC/UFPR**

ELIAS MARIANO DE QUADROS

**ESTUDO DE EFEITOS MECÂNICOS E METALÚRGICOS DO
DESEMPENO A QUENTE EM PERFIL LAMINADO ASTM A572**

CURITIBA
2013

ELIAS MARIANO DE QUADROS

**ESTUDO DE EFEITOS MECÂNICOS E METALÚRGICOS DO
DESEMPENO A QUENTE EM PERFIL LAMINADO ASTM A572**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Especialista em Engenharia da Soldagem do curso de Especialização em Engenharia da Soldagem da Universidade Federal do Paraná, na área de concentração fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Paulo César Okimoto

CURITIBA

2013

TERMO DE APROVAÇÃO

ELIAS MARIANO DE QUADROS

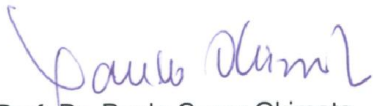
ESTUDO DE EFEITOS MECÂNICOS E METALÚRGICOS DO DESEMPENO A QUENTE EM PERFIL LAMINADO ASTM A572

Monografia aprovada como requisito parcial à obtenção de grau de Especialista em Engenharia da Soldagem, área de concentração Fabricação, no Curso de Especialização em Engenharia da Soldagem, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Banca Examinadora:


Prof. Dr. Hélio Padilha
UFPR


Prof. Dr. Ramon Sigifredo Cortés Paredes
UFPR


Prof. Dr. Paulo Cesar Okimoto
UFPR

Curitiba, 31 de outubro de 2013.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Paulo César Okimoto, pela orientação e apoio que viabilizaram a realização deste trabalho.

Aos setores de materiais e fabricação da Brafer pelo auxílio com os corpos de prova.

À Spectroscan pelo apoio com os ensaios.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é analisar os efeitos mecânicos e metalúrgicos do desempenho a quente em perfis ASTM A572 grau 50 que é um aço estrutural de alta resistência e baixa liga nióbio-vanádio. Para isso, foi estabelecido um programa de testes/ensaios, a partir de um perfil W desse material “como laminado”.

Desempeno a quente é um processo de reparo em que o calor controlado é aplicado, em padrões específicos, nas regiões de aço plasticamente deformadas, em ciclos de aquecimento e resfriamento repetitivo com o objetivo de endireitar/alinhar gradualmente o componente. O processo baseia-se nas restrições internas e externas, que produzem expansão durante a fase de aquecimento e contração no plano durante a fase de resfriamento.

Os empenamentos e distorções podem aparecer de forma aleatória na fabricação das estruturas porém, para correção é necessário distinguir certos padrões e características embora, muitas vezes, estão envolvidas combinações de diferentes tipos de empenamentos. Existem vários tipos de padrões de aquecimento simples. Desempeno a quente efetivo e eficaz resulta quando esses padrões são estipulados em combinações específicas. Neste estudo foi utilizado o padrão de aquecimento em V.

O programa de testes e ensaios realizados envolveu o desenvolvimento de corpos de prova (CPs) extraídos do perfil W “como laminado”. Esses CPs passaram por ciclos de aquecimento/resfriamento simulando situações práticas do processo de desempenho a quente. Foram realizados ensaios tração, Charpy, microdureza e metalografia.

Palavras-chave: Desempeno a quente, aquecimento em V, empenamento.

ABSTRACT

The objective of this work is to analyze the heat straightening mechanical and metallurgical effects in ASTM A572 grade 50 which is a high strength low alloy niobium-vanadium structural steel. For this, we established a program of tests from an "as rolled" profile.

Heat straightening is a repair process in which controlled heat is applied in specific patterns in the regions of plastically deformed steel in cycles of repeated heating and cooling in order to gradually straighten the component. The process is based on internal and external constraints, which produce expansion during the heating phase and contraction in the plane during the cooling phase.

The warping and distortion may appear randomly in the manufacture of steel structures but in its correction is necessary to distinguish certain patterns and characteristics. However, often are involved combinations of different types of warping. There are various kinds of simple patterns of heating. Heat straightening effective and efficient results when these standards are set out in specific combinations. In this study we used a Vee heating pattern.

The tests program involved the development of coupons extracted from the "as-rolled" profile. These coupons have gone through cycles of heating / cooling simulating practical heat straightening situations. Were performed tensile, Charpy, hardness and metallography tests.

Keywords: Heat straightening, Vee heating, warping.

SUMÁRIO

RESUMO	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xi
INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA	2
2.2 EFEITOS DA ADIÇÃO DE MICROLIGANTES	3
2.3 O AÇO ASTM A572 GRAU 50	5
2.4 DESEMPENO A QUENTE	6
2.4.1 Tipos de Empenamentos Típicos	6
2.4.2 Categoria S	6
2.4.3 Categoria W	7
2.4.4 Categoria T	7
2.4.5 Categoria L	8
2.4.6 Uso da Classificação	8
2.5 CONCEITOS BÁSICOS DO DESEMPENO A QUENTE	8
2.5.1 O Que é o Desempeno a Quente?	8
2.5.2 Por que desempenho a quente funciona	10
2.5.3 Padrões fundamentais de Aquecimento	10
2.5.3.1 Aquecimento em V	11
2.5.3.2 Aquecimentos de bordas.	13
2.5.3.3 Aquecimentos em linha	14
2.5.3.4 Pontos de aquecimento	16
2.5.3.5 Aquecimentos em tiras	16
2.6 DEFININDO PADRÕES BÁSICOS DE EMPENAMENTOS E ZONAS DE ESCOAMENTO	18
2.6.1 Padrões Básicos de Aquecimento	20

2.6.2 Empenamento Sobre o Eixo Principal (Categoria S)	20
2.6.3 Membros Estruturais Empenados em Relação à Seus Eixos Fortes – Principais (Categoria S)	21
2.6.4 Membros Estruturais Empenados Sobre Seus Eixos Fracos (Categoria W) ...	23
2.6.5 Membros Estruturais Sujeitos a Empenamentos Torcionais (Categoria T)	23
2.6.6 Flanges e Almas com Danos Localizados (Categoria L)	25
2.6.7 Cantoneiras	27
2.6.8 Empenamentos/Danos Complexos	28
2.7 EFEITOS DO DESEMPENO A QUENTE NAS PROPRIEDADES DO MATERIAL AÇO	28
3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	31
3.1 PROCEDIMENTO DE DESEMPENO	32
3.1.1 Controle de Temperatura no Processo de Desempeno a Quente	33
3.1.2 Resfriamento	34
3.2 CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE TRAÇÃO	34
3.3 CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE METALOGRAFIA E MICRODUREZA	35
3.4 CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE CHARPY	36
3.5 EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS	37
3.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE SEGURANÇA	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
4.1 CONSIDERANDO AS PROPRIEDADES MECÂNICAS	38
4.2 CONSIDERANDO AS PROPRIEDADES METALÚRGICAS	40
4.3 CONSIDERANDO O ENSAIO DE MICRODUREZA	45
CONCLUSÕES	47
RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	48
REFERÊNCIAS	49
ANEXOS	50
ANEXO I – RELATÓRIO DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO	50
ANEXO II – CERTIFICADO DO PERFIL LAMINADO UTILIZADO	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Ilustração de empenamento da categoria S	6
Figura 02 - Ilustração de empenamento da categoria W	7
Figura 03 - Ilustração de empenamento da categoria T	7
Figura 04 - Ilustração de empenamento da categoria L	8
Figura 05 - Estágios de movimento durante o aquecimento em V.	12
Figura 06 - Diagrama esquemático de aquecimento nas bordas usados para curvar uma viga a quente.....	13
Figura 07 - Esquema do mecanismo de aquecimento em linha	15
Figura 08 - Esquema de aquecimento em tira na flange (aba) de um perfil laminado	17
Figura 09 - Zonas de escoamento para padrões de empenamentos básicos	18
Figura 09A - Zonas de escoamento para padrões de empenamentos básicos (Continuação)	19
Figura 10 - Zona de escoamento e esquema de aquecimento em V e tiras para um empenamento de categoria S em uma viga laminada.	21
Figura 11 - Padrão de aquecimento em V em chapa sobre zona de escoamento. ..	22
Figura 12 - Padrões de aquecimento para grandes vigas de abas largas e perfis U empenados em relação aos eixos principais (Categoria S).	22
Figura 13 - Padrões de aquecimento para perfis de abas largas e perfis U empenados sobre seus eixos menores (Categoria W).....	24
Figura 14 - Perfis de abas largas e U com empenamentos torcionais (Categoria T)	24
Figura 15 - Padrões de aquecimento típicos para danos localizados.....	26
Figura 16 - Padrões de aquecimento para cantoneiras	27
Figura 17 - Diagrama de fases ferro-carbeto de ferro.	29
Figura 18 - Visão geral das secções feitas no perfil laminado.....	31
Figura 19 - Croqui de uma das secções do perfil.....	31
Figura 20 - Esboço da região a ser aquecida e de onde serão removidos os corpos de prova	32
Figura 21 - Aquecimento em V com maçarico.....	33

Figura 22 - Medição da temperatura de aquecimento com termômetro de contato	.33
Figura 23 - Resfriamento brusco com água	34
Figura 24 - Chapas de teste para ensaio de tração	34
Figura 25 - Chapas de teste. Da região central foram removidos os corpos de prova	35
Figura 26 - Corpos de prova para ensaio metalográfico e de microdureza	36
Figura 27 – Esboço da região a ser aquecida e de onde serão removidos os corpos de prova de Charpy e micrografia	36
Figura 28 – Microestrutura do material como laminado (ampliação 100x)	40
Figura 29 - Microestrutura do material próxima a superfície oposta à região aquecida (ampliação 100x)	41
Figura 30 - Microestrutura do material próxima à região central da espessura do CP (ampliação 100x)	41
Figura 31 - Microestrutura do material a aproximadamente 4 mm da superfície aquecida (ampliação 100x)	41
Figura 32 - Microestrutura do material a aproximadamente 3 mm da superfície aquecida (ampliação 100x)	41
Figura 33 - Microestrutura do material a aproximadamente 2 mm da superfície aquecida (ampliação 100x)	41
Figura 34 - Microestrutura do material a aproximadamente 1 mm da superfície aquecida (ampliação 100x)	41
Figura 35 - Microestrutura do material próxima a superfície oposta à região aquecida (ampliação 100x)	42
Figura 36 - Microestrutura do material próxima à região central da espessura do CP (ampliação 100x)	42
Figura 37 - Microestrutura do material a aproximadamente 4 mm da superfície aquecida (ampliação 100x)	42
Figura 38 - Microestrutura do material a aproximadamente 3 mm da superfície aquecida (ampliação 100x)	42
Figura 39 - Microestrutura do material a aproximadamente 2 mm da superfície aquecida (ampliação 100x)	42
Figura 40 - Microestrutura do material a aproximadamente 1 mm da superfície aquecida (ampliação 100x)	42

Figura 41 - Microestrutura do material próxima a superfície oposta à região aquecida (ampliação 100x)	43
Figura 42 - Microestrutura do material próxima à região central da espessura do CP (ampliação 100x).....	43
Figura 43 - Microestrutura do material a aproximadamente 4 mm da superfície aquecida (ampliação 100x)	43
Figura 44 - Microestrutura do material a aproximadamente 3 mm da superfície aquecida (ampliação 100x)	43
Figura 45 - Microestrutura do material a aproximadamente 2 mm da superfície aquecida (ampliação 100x)	43
Figura 46 - Microestrutura do material a aproximadamente 1 mm da superfície aquecida (ampliação 100x)	43
Figura 47 - Microestrutura do material próxima a superfície oposta à região aquecida (ampliação 100x)	44
Figura 48 - Microestrutura do material próxima à região central da espessura do CP (ampliação 100x).....	44
Figura 49 - Microestrutura do material a aproximadamente 4 mm da superfície aquecida (ampliação 100x)	44
Figura 50 - Microestrutura do material a aproximadamente 3 mm da superfície aquecida (ampliação 100x)	44
Figura 51 - Microestrutura do material a aproximadamente 2 mm da superfície aquecida (ampliação 100x)	44
Figura 52 - Microestrutura do material a aproximadamente 1 mm da superfície aquecida (ampliação 100x)	44

INTRODUÇÃO

O processo de desempenho a quente, também chamado de desempenho por calor e desempenho por chama, é um processo que se emprega na indústria para corrigir deformações principalmente em estruturas/construções soldadas. Sendo que uma questão importante pode ser colocada: será que esses processos de desempenho a quente podem comprometer a integridade estrutural do aço?

O calor controlado é aplicado, em padrões específicos, nas regiões de aço plasticamente deformadas, em ciclos de aquecimento e resfriamento repetitivo com o objetivo de endireitar gradualmente o componente. O processo baseia-se nas restrições internas e externas, que produzem expansão durante a fase de aquecimento e contração no plano durante a fase de resfriamento.

Para correção de empenamentos e distorções, através de desempenho a quente, é necessário compreender e estabelecer certos padrões e características envolvendo os tipos de empenamento bem como áreas e formatos a serem aquecidos. No caso analisado neste trabalho foi utilizado um dos tipos de aquecimento mais comuns que é o aquecimento em V embora, em casos mais complexos, pode ser necessária combinação de vários tipos de aquecimento.

O objetivo deste trabalho é analisar os efeitos mecânicos e metalúrgicos do desempenho a quente em perfis ASTM A572 grau 50. Para isso, a partir de um perfil W como laminado, foi estabelecido um programa de testes/ensaios de tração, Charpy, microdureza e metalografia.

O programa de testes/ensaios foi realizado em um perfil W ASTM A572 grau 50 “como laminado” e que ainda não havia sido utilizado. Portanto os resultados não se aplicam diretamente ao possível retrabalho de estruturas previamente danificadas, por exemplo, amassadas ou dobradas, e que poderiam ser recuperadas através de desempenho a quente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA

Aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) (do inglês HSLA) ou aços microligados, são projetados para proporcionar melhores propriedades mecânicas e / ou maior resistência à corrosão atmosférica do que aços carbono convencionais. Eles não são considerados como sendo os aços liga, no sentido normal, porque eles foram concebidos para satisfazer propriedades mecânicas específicas em vez de uma determinada composição química (aços ARBL possuem resistência ao escoamento superior a 275 MPa ou 40 ksi). A composição química de um aço ARBL específico pode variar para diferentes espessuras do produto para atender aos requisitos de propriedades mecânicas. Os aços ARBL em forma de folha ou chapa tem baixo teor de carbono (0,05 a 0,25% de C), a fim de produzir conformabilidade e soldabilidade adequadas, e têm um conteúdo de manganês de até 2,0%. Pequenas quantidades de cromo, níquel, molibdênio, cobre, nitrogênio, vanádio, nióbio, titânio e zircônio são usados em várias combinações. (HIGH-Strength Low-Alloy Steels, tradução nossa)

Aços ARBL podem ser divididos em seis categorias:

- aços resistentes à intempéries (patináveis), que contêm pequenas quantidades de elementos de liga, tais como cobre e fósforo para melhorar a resistência à corrosão atmosférica e aumento da resistência por solução sólida.
- aços ferrita-perlita microligados, que contêm adições muito pequenas (geralmente, menos do que 0,10%), de elementos formadores de carbonetos ou carbonitretos, tais como nióbio, vanádio e / ou titânio para aumento de resistência por precipitação, refinamento de grão, e possibilitar o controle da temperatura de transformação.
- Aços perlíticos laminados, que podem incluir aços carbono-manganês, mas que também pode ter pequenas adições de outros elementos de liga para aumentar a resistência, tenacidade, conformabilidade e soldabilidade.

- Aços com ferrita acicular (bainita de baixo teor de carbono), que são os aços de baixo carbono (menos de 0,05% C) com uma excelente combinação de alta resistência ao escoamento, (tão alto quanto 690 MPa, ou 100 ksi) soldabilidade, conformabilidade e boa tenacidade.

- aços bifásicos, que possuem uma microestrutura de martensita dispersa numa matriz ferrítica que proporciona uma boa combinação de ductilidade e de elevada resistência à tração.

- Aços com inclusões de forma controlada, que proporcionam uma melhor ductilidade e tenacidade através da espessura por pequenas adições de cálcio, zircônio ou titânio, ou talvez de elementos de terras raras, de modo que a forma de inclusões de sulfetos é alterada de faixas alongadas para glóbulos quase esféricos pequenos e dispersos.

Estas categorias não são necessariamente agrupamentos distintos, pois um aço ARBL pode ter características de mais do que um agrupamento. Por exemplo, todos os tipos de aços acima podem estar na forma de inclusão controlada. Aço ferrita-perlita microligado também pode ter ligas adicionais para resistência à corrosão e aumento de resistência por solução sólida (HIGH-Strength Low-Alloy Steels, tradução nossa).

2.2 EFEITOS DA ADIÇÃO DE MICROLIGANTES

A ênfase nesta seção é colocada em aços microligados ferrita-perlita, caso do ASTM A572, que utilizam adições de elementos de liga, tais como nióbio e vanádio para aumentar a resistência de aço laminados a quente, sem aumento do teor carbono e / ou de manganês.

Extensos estudos durante os anos 1960 sobre os efeitos de nióbio e vanádio, sobre as propriedades dos materiais estruturais resultaram na descoberta de que pequenas quantidades de nióbio e vanádio (< 0,10% de cada) reforçam os aços carbono-mangânês padrão, sem interferir com o processamento subsequente. O teor de carbono, portanto, pode ser reduzido para melhorar a tenacidade e soldabilidade porque os efeitos de aumento da resistência do nióbio e vanádio compensam a redução na resistência, devido à redução do teor em carbono. (HIGH-Strength Low-Alloy Steels, tradução nossa)

As propriedades mecânicas dos aços ARBL microligado resultam, no entanto, a partir de mais do que apenas a mera presença de elementos microligantes. O desenvolvimento de processos de laminação controlada, juntamente com o projeto de liga tem produzido aumento nos níveis de resistência ao escoamento acompanhado por uma redução gradual do teor de carbono. Muitos dos aços ARBL microligados têm teores de carbono tão baixos quanto 0,06% ou mesmo mais baixos, mas ainda são capazes de desenvolver tensões de escoamento de 485 MPa (70 ksi). A alta resistência ao escoamento é conseguida pelos efeitos combinados de tamanho de grão fino desenvolvidos durante a laminação e aumento de resistência por precipitação que ocorre devido à presença de vanádio, nióbio e titânio (HIGH-Strength Low-Alloy Steels, tradução nossa).

Os vários tipos de aços ferrita-perlita microligados incluem:

- Aços microligados ao vanádio
- Aços microligados ao Nióbio
- Aços microligados Nióbio-Vanádio
- Aços Nióbio-Molibidênio
- Aços microligados Vanádio-nitrogênio
- Aços microligados ao Titânio
- Aços microligados Nióbio-Titânio
- Aços microligados Vanádio-titânio

Estes aços podem também incluir outros elementos para melhorar a resistência à corrosão e aumento da resistência por solução sólida, ou aumentar o endurecimento. (HIGH-Strength Low-Alloy Steels, tradução nossa)

2.3 O AÇO ASTM A572 GRAU 50

Da norma ASTM A572 / A572M - 12a “Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel” “Especificação para aços estruturais de alta resistência e baixa liga nióbio-vanádio”, cuja especificação abrange os requisitos padrão para os graus 42 [290], 50 [345], 55 [380], 60 [415], e 65 [450] de alta resistência e baixa liga nióbio-vanádio para perfis estruturais de aço, chapas, chapas finas e barras para aplicações em estruturas aparafusadas, soldadas e rebitadas, estruturas de pontes e edifícios. A liga deve estar de acordo com os conteúdos necessários de nióbio, vanádio, titânio e nitrogênio. Os valores permitidos para a espessura e dimensões do produto são especificados. Requisitos de tração (incluindo tensão de escoamento, resistência à tração e alongamento mínimo) e teor de liga também são especificados. (ASTM A572/A572M, 2007)

Aços microligados nióbio-vanádio, que é o caso do ASTM A572 grau 50, proporcionam alta resistência ao escoamento com laminação a quente convencional. Através desse processo, os aços nióbio-vanádio derivam quase a totalidade de seu aumento na resistência do endurecimento por precipitação e, por conseguinte, têm elevadas temperaturas de transição dúctil-frágil. Se o aço é obtido por laminação controlada, a adição de ambos nióbio e vanádio juntos é especialmente vantajosa para o aumento da resistência ao escoamento e diminuição da temperatura de transição dúctil-frágil por refinamento de grão. (HIGH-Strength Low-Alloy Steels, tradução nossa)

Normalmente os aços nióbio-vanádio são produzidos com conteúdos relativamente baixos de carbono. Isso reduz a quantidade de perlita e melhora a tenacidade, ductilidade e soldabilidade. Estes aços são frequentemente referidos como aços de perlita reduzida. (HIGH-Strength Low-Alloy Steels, tradução nossa)

2.4 DESEMPENO A QUENTE

2.4.1 Tipos de Empenamentos Típicos

São aqui descritos os principais tipos de empenamentos que ocorrem e os princípios aplicam-se a qualquer tipo de estrutura de aço. Os empenamentos podem resultar de uma variedade de causas talvez a principal e mais frequente seja a distorção descontrolada durante a construção. Enquanto os empenamentos e distorções nas estruturas podem aparecer de forma aleatória, certos padrões e características são distinguíveis. Uma maneira conveniente de classificar empenamento é definir os quatro padrões fundamentais de empenamentos, embora muitas vezes estão envolvidas combinações destes tipos. As categorias fundamentais empenamentos são (GUIDE for heat-straightening of damaged steel bridge members, tradução nossa):

2.4.2 Categoria S

Este tipo refere-se aos empenamentos como resultado da curvatura sobre o eixo "forte" ou eixo principal. Para perfis laminados ou soldados, o elemento da alma é dobrado em torno do seu eixo forte, com uma flange (aba) em compressão e uma em tração. Além da deformação plástica, a flange comprimida e a alma, por vezes, apresentam curvaturas localizadas devido às elevadas tensões de compressão. Um exemplo típico é mostrado na Figura 01. (GUIDE for heat-straightening of damaged steel bridge members, tradução nossa)

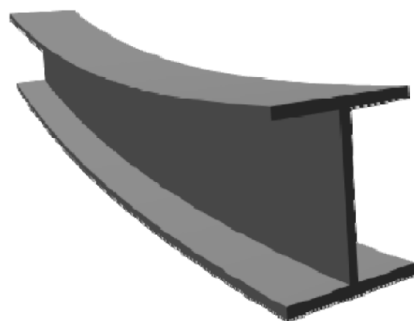


Figura 01 - Ilustração de empenamento da categoria S

2.4.3 Categoria W

Esta categoria refere-se a empenamentos como resultado da curvatura sobre o eixo "fraco" ou eixo secundário. Para perfis laminados ou soldados o eixo neutro é geralmente dentro ou próximo, à alma. Consequentemente, a alma não pode escoar ou deformar-se dentro da faixa inelástica. Se não houver restrição lateralmente, os elementos de flange (abas) são dobrados sobre seus eixos fortes e, geralmente, apresentam padrões de flexão clássicos. (GUIDE for heat-straightening of damaged steel bridge members, tradução nossa)

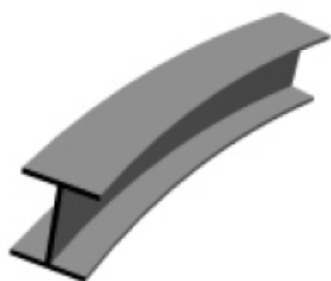


Figura 02 - Ilustração de empenamento da categoria W

2.4.4 Categoria T

Este tipo refere-se aos empenamentos como resultado da torção sobre o eixo longitudinal do membro. Para perfis laminados ou soldados, se não forem apoiados lateralmente, os elementos de flange (abas) tendem a apresentar deformação plástica à flexão em direções opostas. A alma é muitas vezes tensionada em níveis inferiores ao escoamento. (GUIDE for heat-straightening of damaged steel bridge members, tradução nossa)



Figura 03 - Ilustração de empenamento da categoria T

2.4.5 Categoria L

Esta categoria inclui os empenamentos de natureza localizada. Por exemplo, dobras e amassamentos localizados.

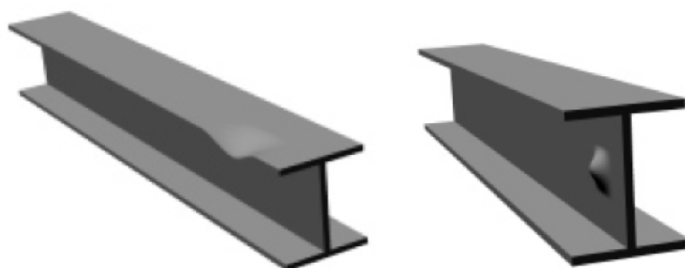


Figura 04 - Ilustração de empenamento da categoria L

2.4.6 Uso da Classificação

A importância deste sistema de classificação é que os padrões de aquecimento bem definidos podem ser estabelecidos para cada categoria. Uma vez que esses padrões são compreendidos, eles podem ser usados em combinação para empenamentos complexos que incluem várias categorias. (GUIDE for heat-straightening of damaged steel bridge members, tradução nossa)

2.5 CONCEITOS BÁSICOS DO DESEMPENO A QUENTE

2.5.1 O Que é o Desempeno a Quente?

Desempeno a quente é um procedimento de reparação em que o calor controlado é aplicado em padrões específicos para as regiões de aço plasticamente deformadas em ciclos de aquecimento e resfriamento repetitivo com o objetivo de endireitar gradualmente o componente. O processo baseia-se nas restrições internas e externas, que produzem expansão durante a fase de aquecimento e contração no plano durante a fase de resfriamento. Desempeno a quente é distinto de outros métodos, neste processo, a força não é utilizada como o principal instrumento de alinhamento. Pelo contrário, a dilatação térmica / contração é um processo

assimétrico, em que cada ciclo leva a uma tendência gradual para o alinhamento. (GUIDE for heat-straightening of damaged steel bridge members, tradução nossa)

Deve ser feita uma clara distinção para outros dois métodos, muitas vezes confundidos com desempenho a quente: alinhamento mecânico a quente e trabalho a quente. Alinhamento mecânico a quente difere de desempenho a quente, naquele a força externa é aplicada depois de aquecer para endireitar o componente. Estas forças aplicadas produzem tensões bem acima do escoamento, o que resulta em grandes movimentos durante um único ciclo de calor. Muitas vezes, o membro é completamente alinhado pela aplicação contínua de uma grande força durante um único ciclo. Os resultados deste tipo de alinhamento são imprevisíveis e pouca pesquisa tem sido realizada sobre este procedimento. Preocupações específicas sobre alinhamento mecânico a quente incluem: (GUIDE for heat-straightening of damaged steel bridge members, tradução nossa)

- Fratura pode ocorrer durante o alinhamento
- As propriedades dos materiais podem ser adversamente afetadas
- Podem resultar em curvaturas, enrugamentos ou dobras e outras distorções

A engenharia deve reconhecer que alinhamento mecânico quente é um método não comprovado que pode levar a danos ou degradação do aço. Como tal, o seu uso deve ser considerado apenas para elementos que não transportam cargas ou quando a substituição ou outros métodos não são viáveis.

Trabalho a quente é distinto de desempenho a quente, nàquele ambas as forças externas e calor elevado são utilizados. Este método é semelhante ao alinhamento mecânico a quente em que as forças externas são utilizadas. Além disso, o aço muitas vezes é aquecido acima das temperaturas de transformação microestrutural.

Os resultados deste processo são altamente imprevisíveis e podem resultar em:

- Fratura durante o alinhamento
- Alterações severas na estrutura atômica que pode não ser reversível
- Alterações severas nas propriedades mecânicas, incluindo um elevado grau de fragilização

- Podem resultar em curvaturas, enrugamentos ou dobras e outras distorções

Alguns profissionais tendem a utilizar forças externas e superaquecimento e ainda afirmam ser desempenho a quente. O leitor é alertado para estar ciente destas distinções ao especificar desempenho a quente, alinhamento mecânico a quente ou trabalho a quente. (GUIDE for heat-straightening of damaged steel bridge members, tradução nossa)

2.5.2 Por que desempenho a quente funciona

O conceito básico de desempenho a quente é relativamente simples e se baseia em duas propriedades distintas do aço:

- Se o aço é tracionado ou comprimido além de um certo limite (normalmente referido como escoamento), não assume a sua forma original quando a força é relaxada. Pelo contrário, ele permanece parcialmente alongado ou encurtado, de acordo com a direção da força aplicada originalmente.
- Se o aço é aquecido a temperaturas relativamente moderadas (370-700 ° C ou 700-1300 ° F), expande-se a uma taxa previsível e o seu valor de escoamento torna-se significativamente mais baixo em uma temperatura elevada. (GUIDE for heat-straightening of damaged steel bridge members, tradução nossa)

2.5.3 Padrões fundamentais de Aquecimento

Existem vários tipos de padrões de aquecimento simples. Desempenho a quente efetivo e eficaz resulta quando esses padrões são estipulados em combinações específicas. Como ponto de partida para a compreensão de desempenho a quente , primeiro pode-se considerar uma placa plana. A maioria dos membros de estruturas de aço são um conjunto de elementos de placas dispostos a maximizar a força e rigidez, minimizando o material. Uma vez que a compreensão dos padrões de aquecimento para uma placa única é desenvolvido, estes conceitos podem ser ampliados a outras formas. Existem vários padrões de aquecimento

básicos utilizados para placas planas. (GUIDE for heat-straightening of damaged steel bridge members, tradução nossa)

2.5.3.1 Aquecimento em V

O aquecimento em V é o padrão fundamental usado para alinhar empenamento em relação ao eixo forte (categoria S) de chapas de aço. Como pode ser visto na Figura 05, um aquecimento em V típico inicia-se com uma pequena faixa de calor aplicada no vértice da área em forma de V utilizando-se um maçarico. Quando a temperatura desejada seja atingida (geralmente cerca de 650°C ou 1200°F para o aço baixo carbono), o maçarico é avançado progressivamente num movimento serpentina partindo do vértice do V. Este movimento é eficiente para aquecer progressivamente o V de cima para baixo. A chapa irá inicialmente mover-se para cima (Figura 05a) como um resultado da expansão longitudinal do material acima do eixo neutro produzindo flexão negativa. O material frio adjacente à área aquecida resiste à expansão térmica normal do aço na direção longitudinal. Como resultado, o material aquecido tende a expandir-se, a uma maior extensão através da espessura da placa, o que resulta no fluxo plástico. (GUIDE for heat-straightening of damaged steel bridge members, tradução nossa)

Na conclusão da aplicação do calor, toda a área é aquecida a uma temperatura elevada e relativamente uniforme. Neste ponto, a placa se moveu para baixo (Figura 05b), devido a expansão longitudinal do material abaixo do eixo neutro produzindo flexão positiva. Como o aço esfria, o material contrai-se longitudinalmente para um grau maior do que a expansão durante o aquecimento. Assim, ocorre uma contração. A contração é proporcional à largura através do V, então a quantidade de contração aumenta da parte mais larga para a mais estreita do V. (GUIDE for heat-straightening of damaged steel bridge members, tradução nossa)

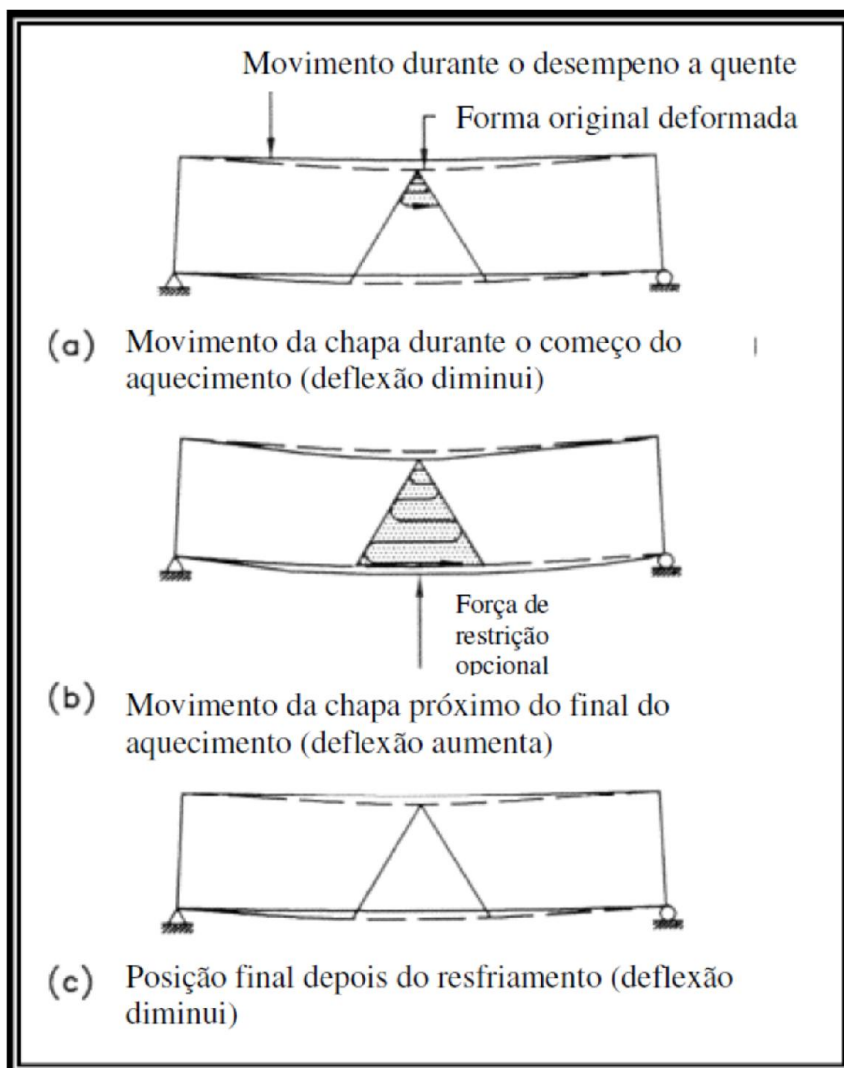


Figura 05 - Estágios de movimento durante o aquecimento em V.

Esta variação produz um fechamento do V. Empenamento é produzido num membro inicialmente alinhado, ou endireitamento ocorre (se a chapa está empenada na direção oposta à do movimento de alinhamento, Figura 05c). Para muitas aplicações, é mais eficiente utilizar um V que se estende ao longo de toda a profundidade do elemento da placa mas, aquecimentos em V de profundidades parciais podem ser aplicados em determinadas situações. Ao utilizar aquecimentos em V de profundidade parcial, a extremidade aberta deve estender-se a borda do elemento. A profundidade do V é variada ao colocar o vértice numa localização de profundidade parcial. Os mais típicos Vs de profundidade parciais são os de três

quartos e meio de profundidade. (GUIDE for heat-straightening of damaged steel bridge members, tradução nossa)

O aquecimento em forma de cunhas é aplicado para remover distorções longitudinais. As condições operacionais para aquecimento a gás e resfriamento a água são determinadas experimentalmente, de acordo com a extensão da distorção, a espessura da chapa etc. Deve-se tomar cuidado para não aquecer excessivamente a região deformada, pois isto poderá fragilizar a junta soldada. (OKUMURA, T., TANIGUCHI, 1982)

2.5.3.2 Aquecimentos de bordas.

Se uma curvatura suave é desejada, uma linha nas bordas longitudinais da peça é aquecida. A linha pode ser contínua ou intermitente, dependendo do grau desejado de curvatura. Esse padrão é usado frequentemente para curvamento a quente de perfis laminados na etapa de fabricação. Um esquema é mostrado na Figura 06.

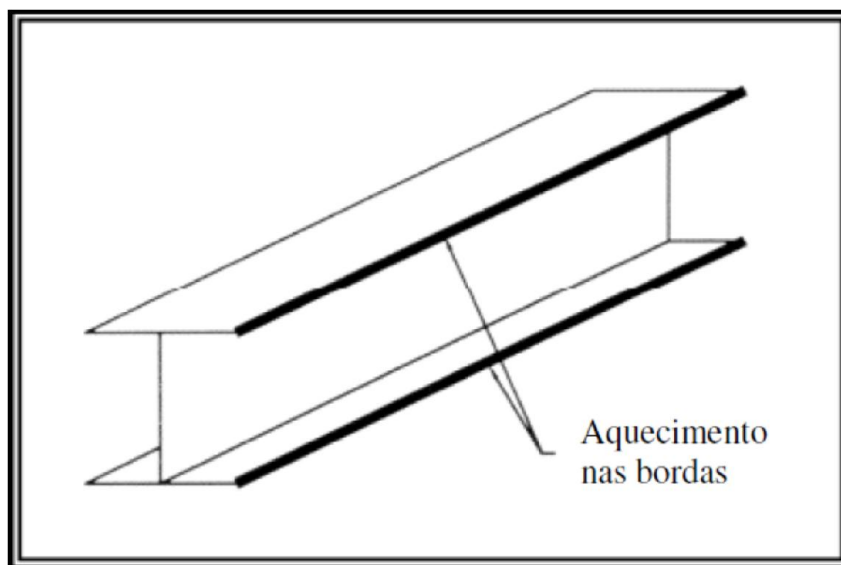


Figura 06 - Diagrama esquemático de aquecimento nas bordas usados para curvar uma viga a quente.

2.5.3.3 Aquecimentos em linha

Aquecimentos em linha são empregados para reparar uma curva numa placa sobre o seu eixo fraco. Tais curvas, severas o suficiente para produzir o escoamento do material, muitas vezes resultam em longas zonas estreitas de escoamento referidas como linhas de escoamento. Uma linha de calor consiste por uma única passagem em linha reta do maçarico. A restrição, neste caso, muitas vezes é fornecida por uma força externa, embora algum movimento irá ocorrer sem restrições exteriores. Este comportamento é ilustrado na Figura 07. Uma linha de calor é aplicada à parte de baixo de um elemento de placa sujeita a momentos de flexão produzidos pelas forças externas (Figura 07a). À medida que o maçarico é aplicado e movido ao longo da placa, a distribuição de temperatura através da espessura diminui (Figura 07b). O material frio a frente da tocha restringe a expansão térmica, mesmo se restrições externas não estão presentes. Por causa do gradiente térmico, mais perturbação ocorre na chapa ao lado do maçarico. (GUIDE for heat-straightening of damaged steel bridge members, tradução nossa)

Durante o resfriamento deste lado conseqüentemente contrai mais, criando um movimento côncavo no lado da chapa que está em contato com o maçarico semelhante à mostrada na Figura 07d. Assim, para endireitar uma placa dobrada em torno do seu eixo fraco, o calor deve ser aplicado ao lado convexo da placa danificada. O movimento pode ser ampliado pela utilização de forças aplicadas, que produzem momentos de flexão sobre a linha de escoamento (Figura 07c). Referindo-se a um corte através da placa transversal à linha de calor (Figura 07c), os momentos de restrição tendem a impedir a expansão transversal abaixo da linha central da placa. De um modo semelhante ao mecanismo de aquecimento em V, o material tende a expandir-se, assim, através da espessura. Após resfriamento, os momentos de restrição tendem a ampliar a contração transversal (Figura 07d). A velocidade do curso da tocha é crítica, uma vez que determina a temperatura atingida. Com restrições adequadas e uma velocidade uniforme da tocha, irá ocorrer uma rotação em torno da linha aquecida. (GUIDE for heat-straightening of damaged steel bridge members, tradução nossa)

O aquecimento em linhas é empregado, via de regra, para endireitar distorções angulares em juntas de topo ou filete. (OKUMURA, T., TANIGUCHI, 1982)

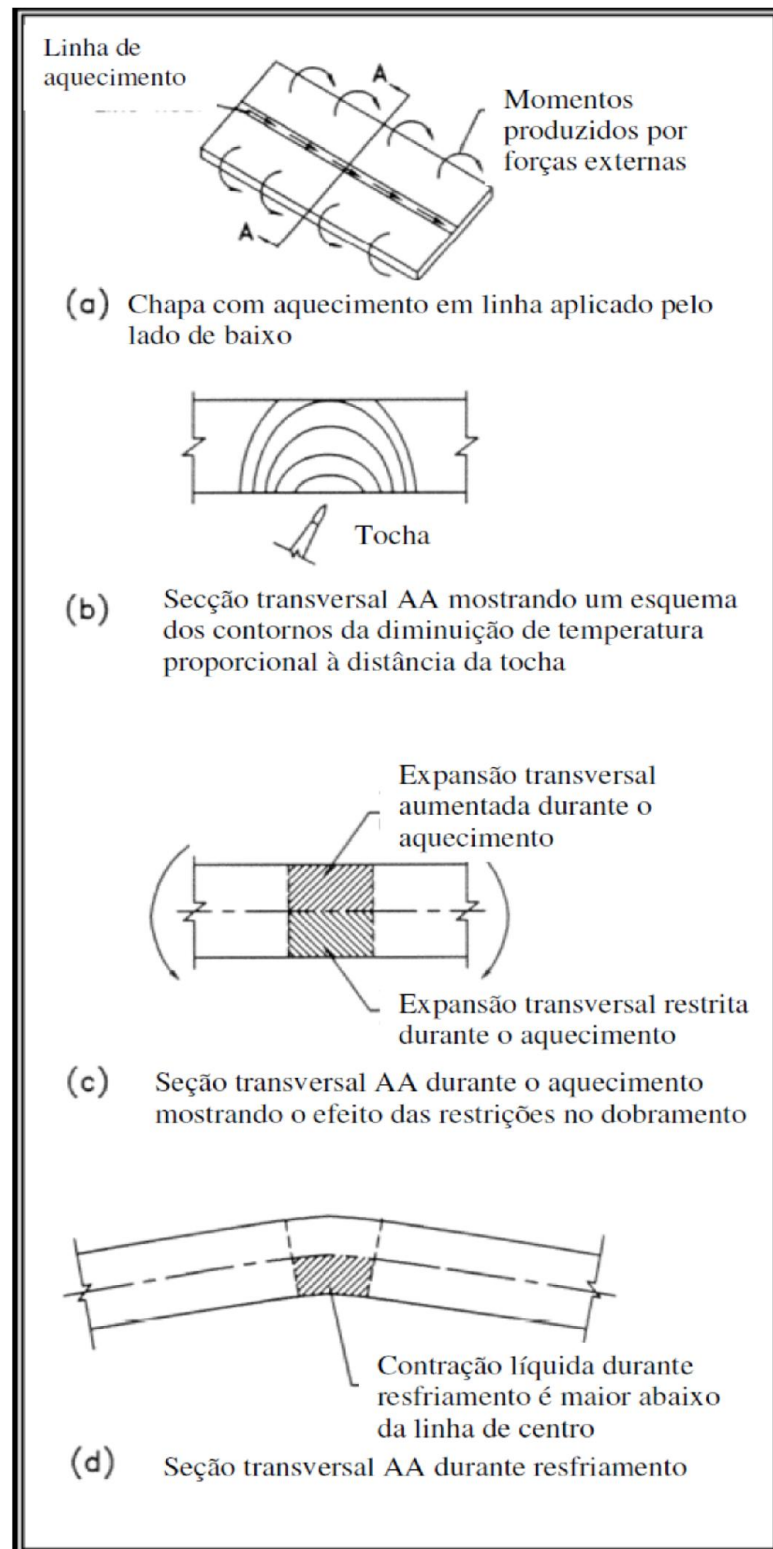


Figura 07 - Esquema do mecanismo de aquecimento em linha

2.5.3.4 Pontos de aquecimento

Para um ponto de aquecimento, uma pequena área arredondada do metal é aquecido movendo o maçarico com um movimento circular lento aumentando o diâmetro até que toda a área do metal é aquecido. Um ponto de aquecimento provoca expansão do metal através da espessura, devido ao sistema de retenção proporcionada pelo material circundante frio. No resfriamento, o ponto de aquecimento alivia tensões de tração em todas as direções radiais em toda a área aquecida. Durante o aquecimento em um ponto, o maçarico não deve ser direcionado em um determinado ponto por muito tempo, como o local pode ficar muito quente e flambagem pode ocorrer devido à expansão térmica excessiva no lado aquecido do membro. Aquecimento em pontos são usados para reparar empenamentos localizados, tais como protuberâncias, amassados e embarrigamentos em elemento de placa. (GUIDE for heat-straightening of damaged steel bridge members, tradução nossa)

O Método de aquecimento por pontos, geralmente, é utilizado em painéis reforçados. (OKUMURA, T., TANIGUCHI, 1982)

2.5.3.5 Aquecimentos em tiras

Aquecimentos em tiras, também chamado de aquecimento retangular, são utilizados para remover uma saliência num elemento de placa, ou para complementar um aquecimento em V. Aquecimentos em tiras são semelhantes aos aquecimentos em V e são realizados de uma maneira semelhante. Começando no ponto de início, a tocha é movida para trás e para frente de forma serpentina através de uma faixa para um comprimento desejado, figura 08. Este padrão sequencialmente traz a tira para a temperatura desejada. A orientação pode ser uma consideração importante. O aquecimento em tiras pode ser iniciado com o ponto médio e muda-se para ambos os lados simultaneamente usando duas tochas. Esta abordagem minimizaria o empenamento do eixo fraco da viga mostrada na Figura 08a. Uma segunda alternativa com um efeito similar é mostrada na Figura 08b, utilizando uma única tocha e começando a partir de um lado. Dependendo da configuração estrutural, a tira pode também ser iniciada com uma borda livre, como

mostrado na Figura 08c. No entanto, sem restrições, essa orientação pode produzir algum empenamento em relação ao eixo fraco. Alternando o ponto de iniciação para as bordas opostas em sucessivos ciclos de aquecimento, o empenamento em relação ao eixo fraco pode ser minimizado. (GUIDE for heat-straightening of damaged steel bridge members, tradução nossa)

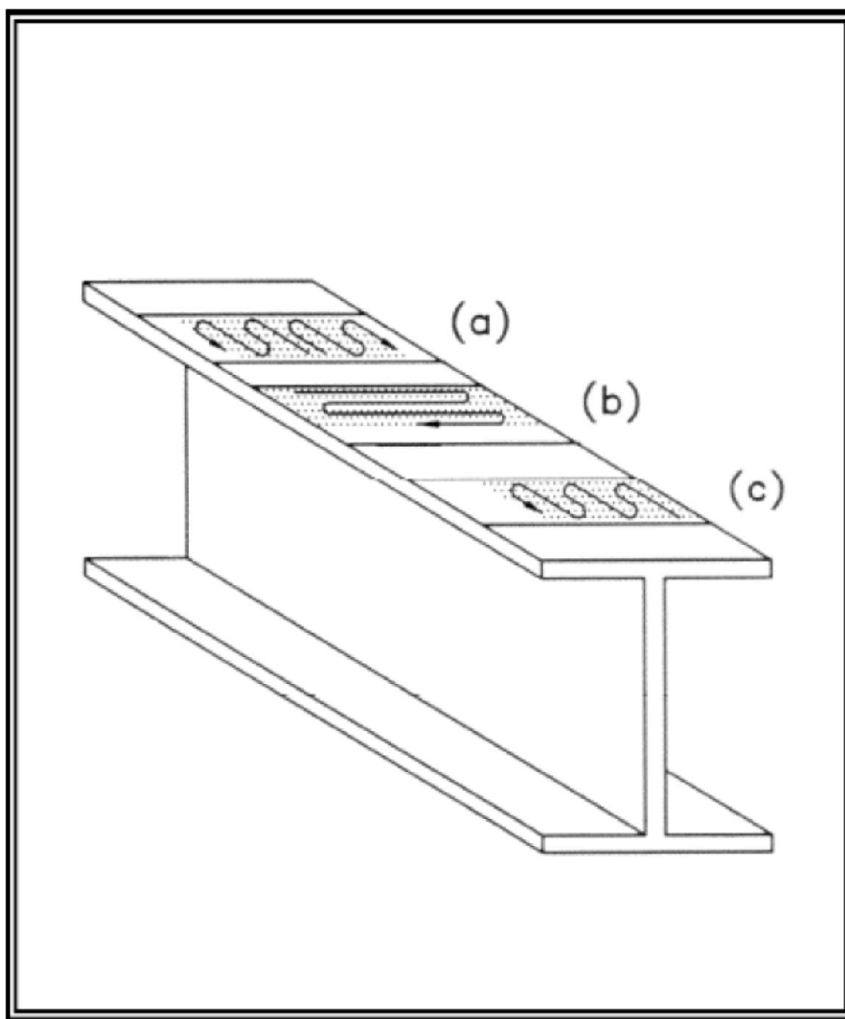


Figura 08 - Esquema de aquecimento em tira na flange (aba) de um perfil laminado.

2.6 DEFININDO PADRÕES BÁSICOS DE EMPENAMENTOS E ZONAS DE ESCOAMENTO

As categorias fundamentais de empenamentos foram definidas anteriormente. Um padrão de escoamento é associado com cada categoria de empenamento. A zona de escoamento do aço é a área em que a deformação plástica ocorre. É importante reconhecer a região de escoamento porque o calor poderia ser aplicado somente na vizinhança das zonas de escoamento. Zonas típicas de escoamento são mostradas nas figuras 09 e 09a. (GUIDE for heat-straightening of damaged steel bridge members, tradução nossa)

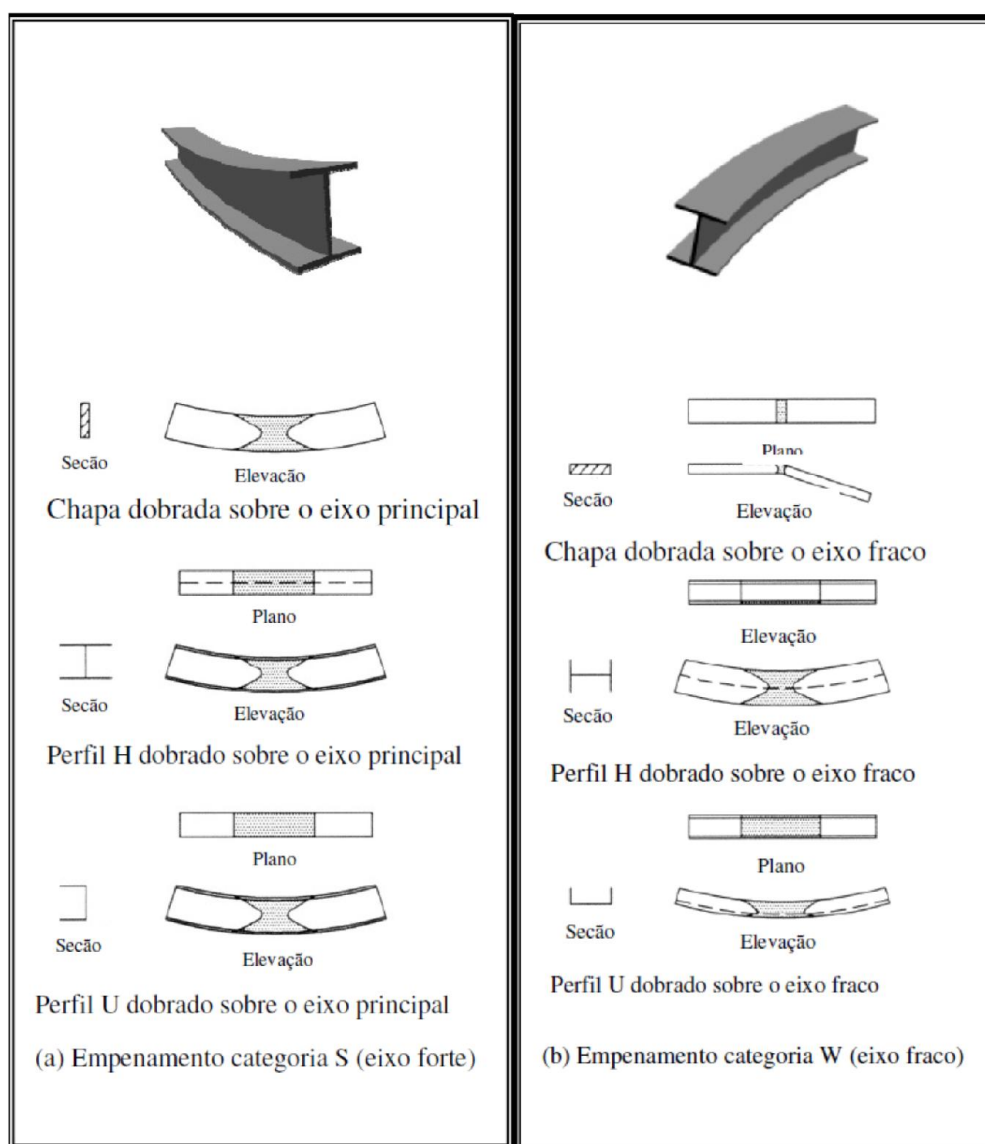
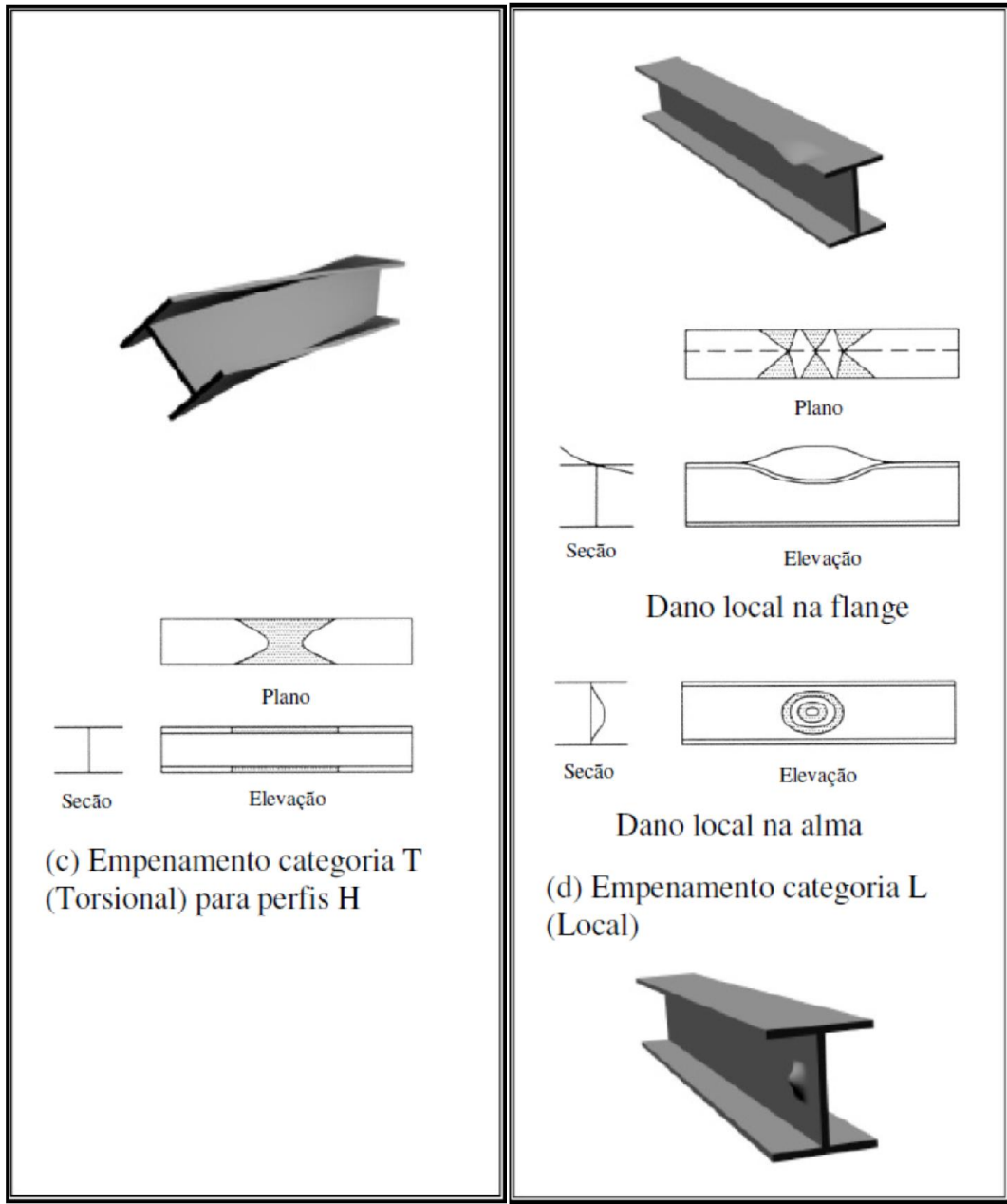


Figura 09 - Zonas de escoamento para padrões de empenamentos básicos



(c) Empenamento categoria T (Torsional) para perfis H

(d) Empenamento categoria L (Local)

Figura 09a - Zonas de escoamento para padrões de empenamentos básicos (Continuação)

2.6.1 Padrões Básicos de Aquecimento

O reparo de componentes de aço empenados exige muitas vezes uma combinação de aquecimento em V, tiras, linhas ou pontos. Uma série de tais aquecimentos, aplicados consecutivamente, como um grupo, é referida como um padrão de aquecimento. A ordem em que estes aquecimentos individuais é conduzida é referida como a sequência de aquecimento. O processo de conduzir um padrão completo de aquecimento e permitir que resfrie é referido como um ciclo de aquecimento. Perfis de aço estruturais podem ser considerados como um conjunto de placas planas. Quase invariavelmente, o empenamento a estas formas envolve alguns desses elementos de placa sobre os seus próprios eixos maiores. Por conseguinte, o desempenho a quente do aço começa com a aplicação do aquecimento em V a tais elementos de placa. (GUIDE for heat-straightening of damaged steel bridge members, tradução nossa)

A aplicação de um único aquecimento em V a uma placa plana já foi descrito. Este aquecimento básico em V é o alicerce para o desempenho a quente dos membros da estrutura. Os padrões de aquecimento utilizados para as quatro categorias fundamentais de empenamentos são descritos nesta seção para as formas típicas de perfis laminados. (GUIDE for heat-straightening of damaged steel bridge members, tradução nossa)

A zona de escoamento para empenamentos da categoria S para uma viga de abas largas é mostrado na Figura 10, juntamente com o padrão de aquecimento adequado. (GUIDE for heat-straightening of damaged steel bridge members, tradução nossa)

2.6.2 Empenamento Sobre o Eixo Principal (Categoria S)

A forma deformada do empenamento típico de uma chapa é mostrada na Figura 11. O padrão de aquecimento é o em V na profundidade total como mostrado. Devido à pequena mudança na curvatura após um padrão de aquecimentos, ciclos de aquecimento e resfriamento são necessários para endireitar completamente uma chapa empenada. Para cada ciclo, o V (ou Vs) deve ser deslocado para um local diferente na vizinhança da região da zona de escoamento, tal como sugerido pelas

linhas tracejadas na Figura 11, para que o mesmo local exato não seja continuamente reaquecido. Mais aquecimento deve ser colocado na parte central da região de escoamento e menos perto das extremidades de modo a refletir a diferença de curvatura. Este princípio aplica-se a todos os padrões de aquecimento nas seções a seguir. (GUIDE for heat-straightening of damaged steel bridge members, tradução nossa)

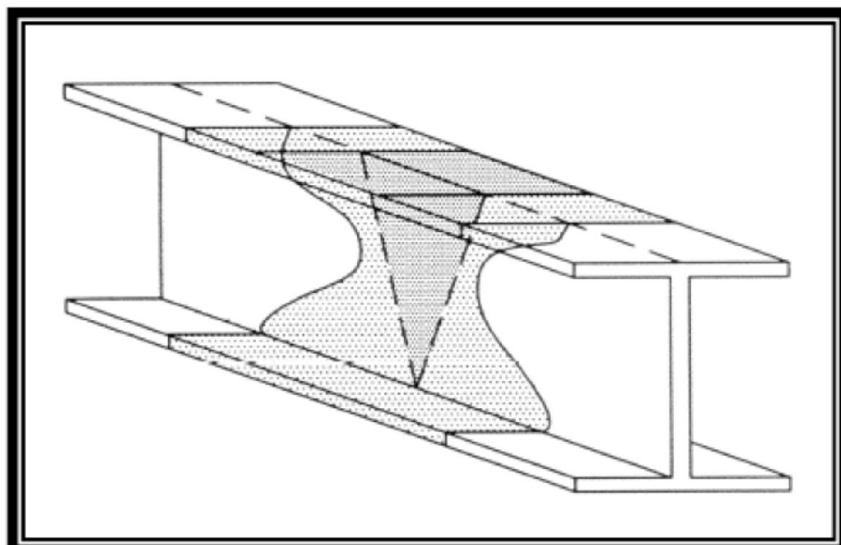


Figura 10 - Zona de escoamento e esquema de aquecimento em V e tiras para um empenamento de categoria S em uma viga laminada.

2.6.3 Membros Estruturais Empenados em Relação à Seus Eixos Fortes (Categoria S)

Como mostrado na Figura 12, o padrão de aquecimento para estes casos consiste de uma combinação de aquecimento em V e tiras. Para fins de definição de padrões de aquecimento, é conveniente referir-se aos elementos de uma seção transversal como elementos primários ou de reforço. Os elementos primários são aqueles danificados por empenamento sobre os seus eixos principais, tais como as almas na Figura 12. Os elementos de reforço são dobrados sobre os seus eixos menores, tais como as flanges na Figura 12. Tipicamente, aquecimentos em V são aplicados aos elementos primários, enquanto tiras, linhas ou nenhum aquecimento podem ser aplicados a elementos de reforço. Para este caso, um aquecimento em V é aplicado primeiramente para a alma. Após a conclusão, um aquecimento em tira é

aplicada à flange na extremidade aberta do V. (GUIDE for heat-straightening of damaged steel bridge members, tradução nossa)

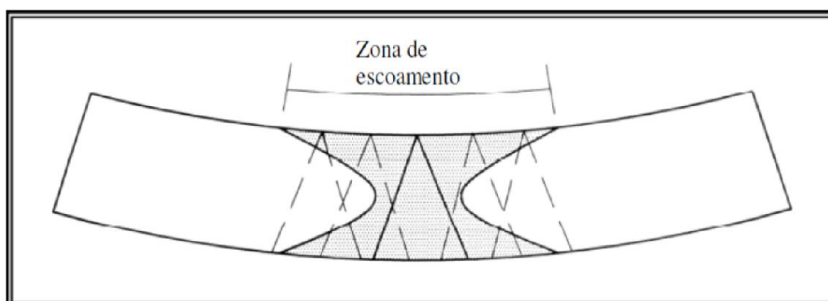


Figura 11 - Padrão de aquecimento em V em chapa sobre zona de escoamento.

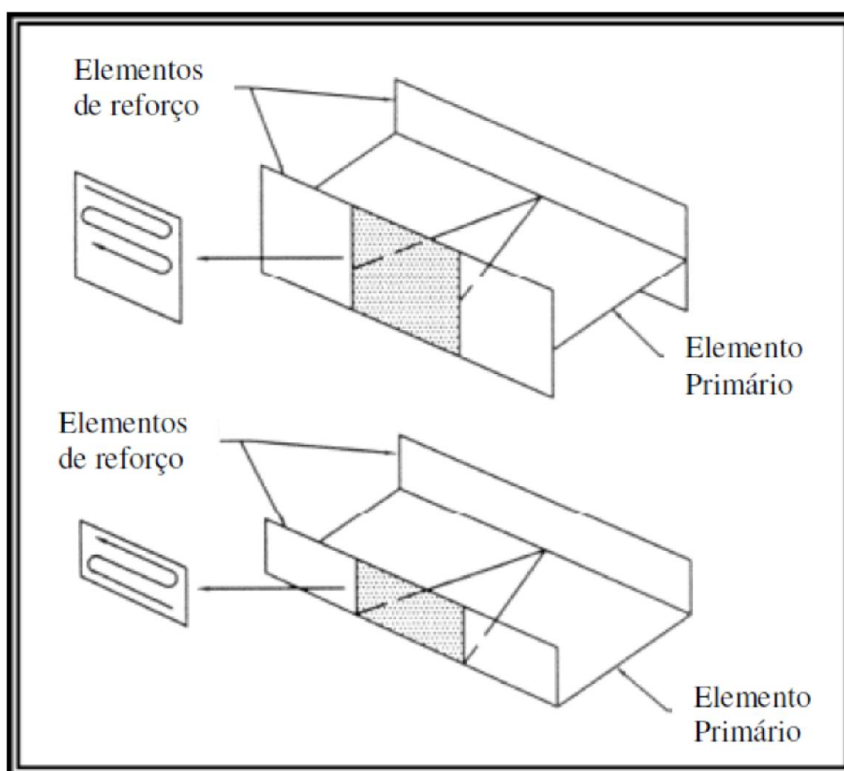


Figura 12 - Padrões de aquecimento para grandes vigas de abas largas e perfis U empenados em relação aos eixos principais (Categoria S).

A largura da tira é igual à largura do V no ponto de interseção. Este procedimento permite que o V feche durante o resfriamento sem restrições a partir do elemento de enrijecimento. Não é aplicado calor na flange no ápice do V. Esta combinação V / tira é repetido por deslocamento ao longo da periferia da zona de escoamento até que o membro seja alinhado. (GUIDE for heat-straightening of damaged steel bridge members, tradução nossa)

2.6.4 Membros Estruturais Empenados Sobre Seus Eixos Fracos (Categoria W)

O padrão de aquecimento para estes casos, é semelhante ao caso anterior, mas notar que os elementos primários e de reforço são invertidos. O calor é aplicado primeiro em V para ambas as flanges (simultaneamente ou um de cada vez), como mostrado na Figura 13. Depois de se aquecer estes elementos primários, uma tira de calor é aplicado à alma. A única exceção é que não se aplica aquecimento em tiras ao elemento de reforço localizado adjacente ao ápice do V uma vez que este elemento oferece pouca restrição ao fechamento do V durante o resfriamento. Note-se que a largura da tira é igual à largura do calor em V no ponto de interseção. Para todos os casos, o padrão é repetido por deslocamento no interior para a periferia da zona de escoamento até que o membro seja alinhado. (GUIDE for heat-straightening of damaged steel bridge members, tradução nossa)

2.6.5 Membros Estruturais Sujeitos a Empenamentos Torcionais (Categoria T)

O padrão de aquecimento para este caso de empenamentos é mostrado na Figura 14. Os Vs nos flanges superior e inferior são revertidos para refletir as diferentes direções de curvatura das flanges opostas. Os aquecimentos em V são aplicados em primeiro lugar e, em seguida, o calor é aplicado em tira. Observe que, para o perfil U, os aquecimentos em tiras só devem ser aplicados a meia profundidade. Esta tira com metade da profundidade permite que o V da flange inferior feche com restrição mínima a partir da alma. (GUIDE for heat-straightening of damaged steel bridge members, tradução nossa)

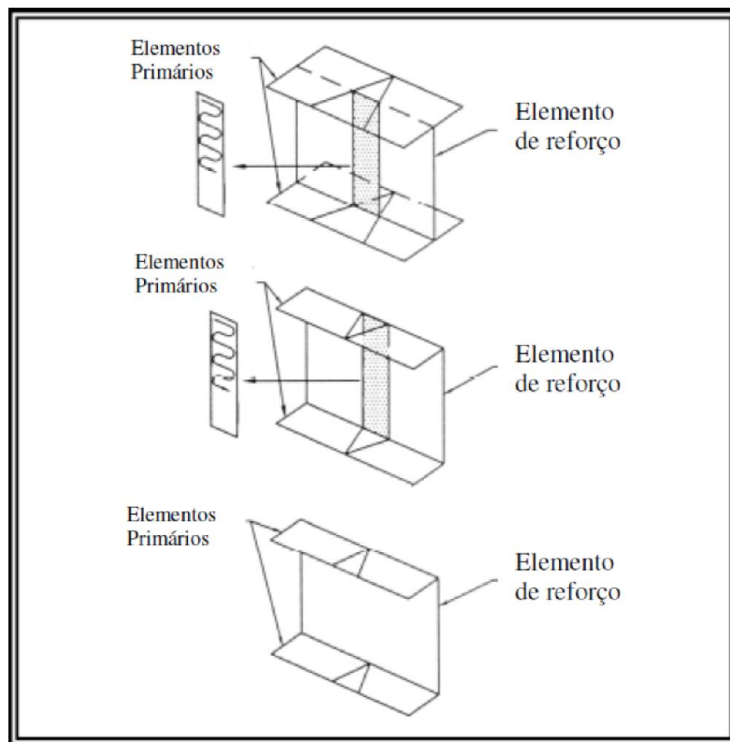


Figura 13 - Padrões de aquecimento para perfis de abas largas e perfis U empenados sobre seus eixos menores (Categoria W).

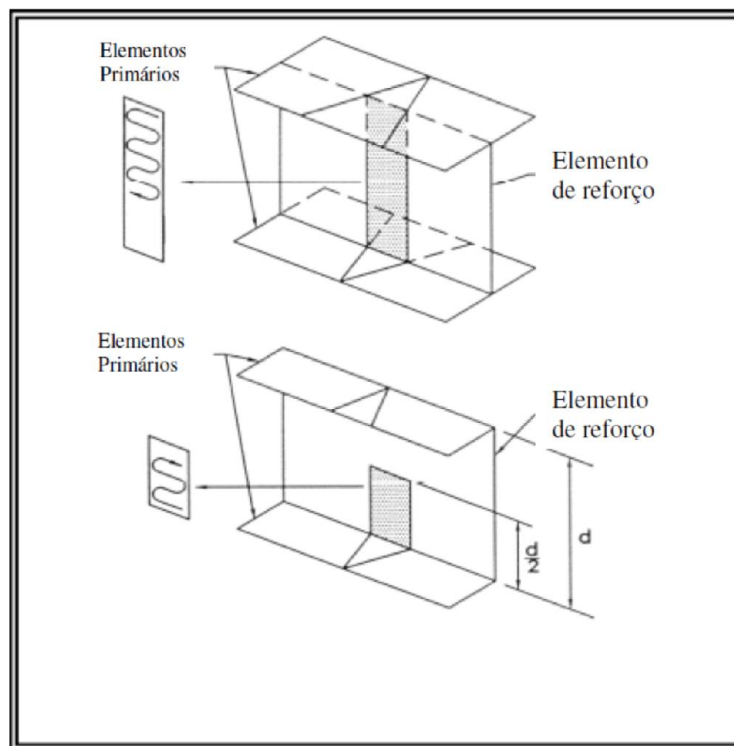


Figura 14 - Perfis de abas largas e U com empenamentos torcionais (Categoria T).

2.6.6 Flanges e Almas com Danos Localizados (Categoria L)

Uma deformação localizada ou protuberância reflete um alongamento de material. A correção requer que a área protuberante seja encurtada. Uma série de aquecimentos em V ou linha podem ser utilizados para este fim, como mostra a figura 15. Estes aquecimentos em Vs são aplicados sequencialmente através da deformação ou em torno dela. Para protuberâncias na alma pode ser usado tanto linhas quanto Vs. Se forem utilizados Vs, que se encontram espaçados de modo que as extremidades abertas dos Vs se toquem. Há uma tendência entre os profissionais práticos de superaquecerem protuberâncias na alma. Para a maioria dos casos, um excesso de calor não é desejado. O modelo preferido é o aquecimento em linhas de raios da roda / vagão. Para o padrão de empenamento da flange (Figura 15b) podem ser usados quer linhas ou uma combinação de linhas e Vs. Para a maioria dos casos, o padrão de linha com poucos ou nenhum Vs tendem a ser mais eficazes. Uma vez que o empenamento de flanges tende a ser assimétrico, mais ciclos de aquecimento são necessárias no lado com maior empenamento. (GUIDE for heat-straightening of damaged steel bridge members, tradução nossa)

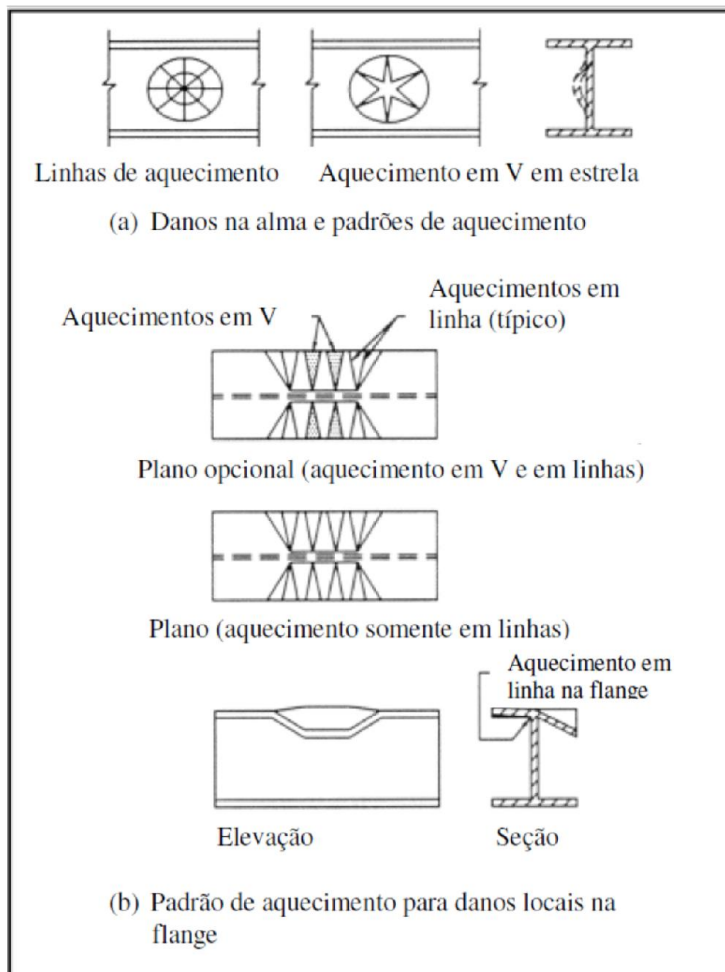


Figura 15 - Padrões de aquecimento típicos para danos localizados.

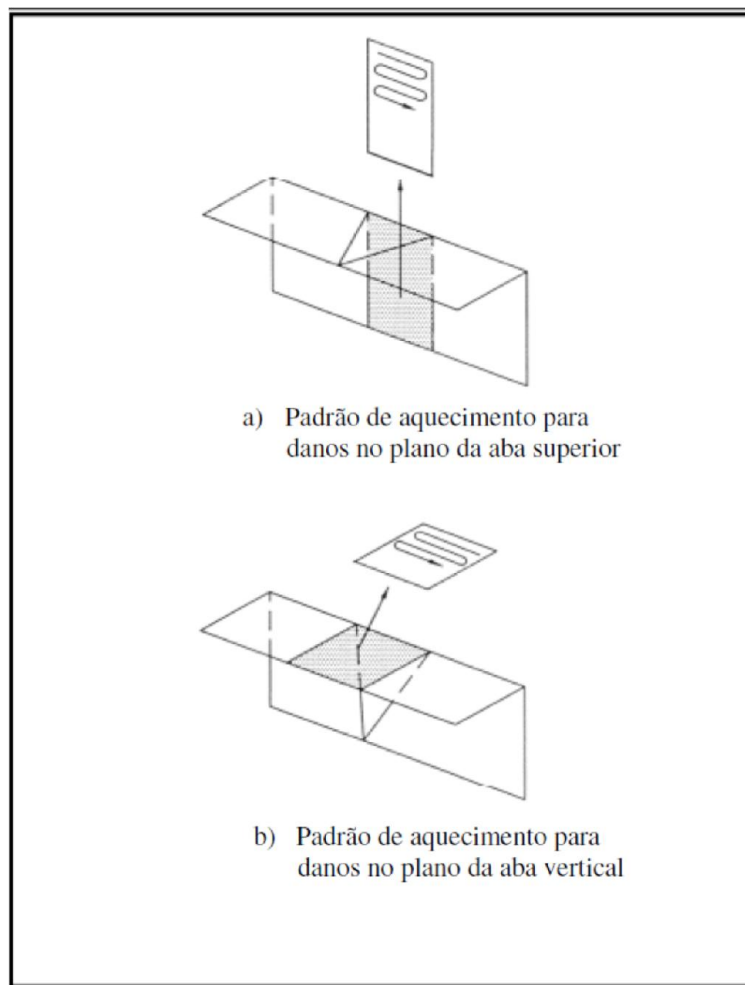


Figure 16 - Padrões de aquecimento para cantoneiras

2.6.7 Cantoneiras

Cantoneiras geralmente não tem um eixo de simetria, o padrão de aquecimento requer uma consideração especial. Normalmente, o padrão de aquecimento semelhante ao de um perfil U. No entanto, o aquecimento em V sobre uma aba de uma cantoneira irá produzir componentes de movimento, tanto paralela e perpendicular à aba aquecida. Assim, o padrão de aquecimento mostrado na Figura 16. pode precisar de ser alternado na aba adjacente. Outro método para minimizar o movimento fora do plano é usar os padrões de aquecimento em tiras sugeridas na Figura 08. (GUIDE for heat-straightening of damaged steel bridge members, tradução nossa)

2.6.8 Empenamentos/Danos Complexos

A maioria das situações de danos/empenamentos não se encaixam perfeitamente em uma das categorias fundamentais de empenamentos. Em vez disso, o empenamento é uma combinação de várias destas categorias. Para reparar estes casos mais complexos, os empenamentos devem ser vistos como uma combinação dos processos fundamentais. A abordagem consiste em preplanejar todo o conjunto de sequências, a partir do componente de empenamento que é mais severo. Enquanto o endireitamento avança, o processo é redirecionado para outros componentes, minimizando a sobreposição que neutralizam ou desnecessariamente reaquecem áreas. Ao concentrar-se nas categorias de empenamento fundamentais, na seqüência, os empenamentos complexos podem ser reparados usando os padrões de aquecimento básicos descritos nas seções anteriores. (GUIDE for heat-straightening of damaged steel bridge members, tradução nossa)

2.7 EFEITOS DO DESEMPENO A QUENTE NAS PROPRIEDADES DO MATERIAL AÇO

O potencial de efeitos negativos do aquecimento do aço tem limitado a implementação de desempenho a quente. No entanto, com uma compreensão das propriedades do aço, o desempenho a quente pode ser conduzido de forma segura. O aquecimento do aço reduz o limite de escoamento, bem como o módulo de elasticidade mas o coeficiente de expansão térmica em geral aumenta com a temperatura. O comportamento destes parâmetros dificulta tentativas de compreender a resposta do aço ao desempenho a quente. Em adição a estes efeitos de curto prazo, o calor pode resultar em consequências a longo prazo que podem ser prejudiciais. (GUIDE for heat-straightening of damaged steel bridge members, tradução nossa)

Aços estruturais mais utilizados em estruturas metálicas são classificados como de baixo carbono, de alta resistência e baixa liga (ARBL) ou aço temperado e revenido (T & R). À temperatura ambiente, estes aços tem três componentes principais: ferrita, cementita e perlita. O diagrama de equilíbrio ferroc carbono

mostrado na Figura 17 ilustra a relação entre estes componentes. Ferrita constituída por átomos de ferro e carbono em solução sólida intersticial, cementita é uma microestrutura de ferrocabono, (Fe_3C); perlita é uma mistura de cementita (12 por cento) e de ferrita (88 por cento). Em um aço carbono com menos de 0,8 %C, esse teor de carbono é insuficiente para desenvolver 100 por cento de perlita, resultando em perlita mais ferrita. Aços de alto teor de carbono (conteúdo de carbono entre 0,8 e 2,0 por cento) têm mais carbono do que a necessária para formar perlita, resultando em aço com cementita parcial. Aços de baixo carbono tendem a ser mais macios e mais dúcteis, características de ferrita, mas cementita é dura e frágil portanto aços de alto carbono são mais duros e menos dúcteis, propriedades pobres para estruturas metálicas. (GUIDE for heat-straightening of damaged steel bridge members, tradução nossa)

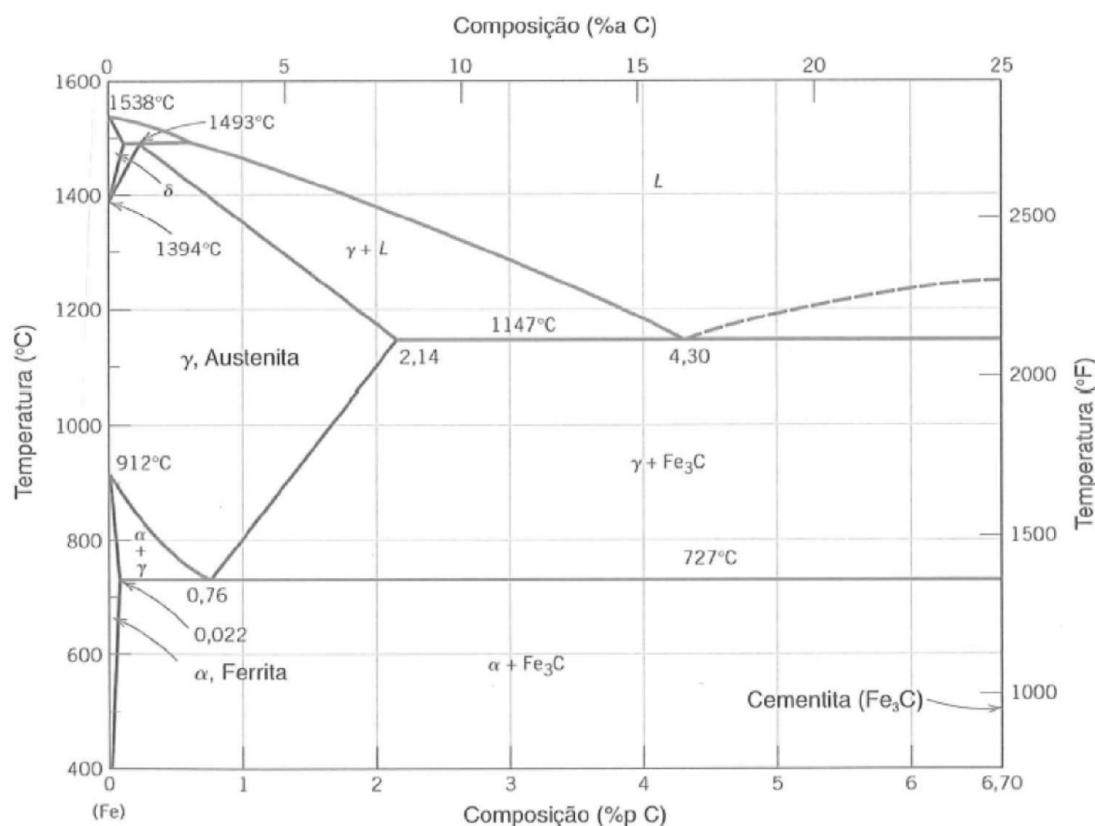


Figura 17 - Diagrama de fases ferro-carbono de ferro. (CALLISTER Jr., W. D., 2012)

É difícil controlar a temperatura em uma fábrica ou no campo, quando se está conduzindo os reparos por desempenho a quente. Por conseguinte, se a temperatura no desempenho a quente não é mantida abaixo da temperatura crítica inferior (727°C), propriedades indesejáveis podem ser produzidas durante o resfriamento. É esta preocupação que tem limitado a aplicação do calor para o desempenho em muitos casos (GUIDE for heat-straightening of damaged steel bridge members, tradução nossa). A norma AWS D1.1 (AWS D1.1/D1.1M, 2010), por exemplo, recomenda que para aços temperados e revenidos a temperatura não deve exceder 600°C e para os demais aços não deve exceder 650°C .

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Com o objetivo de analisar os efeitos mecânicos e metalúrgicos, decorrentes do desempenho a quente em perfis laminados ASTM A572 grau 50, inicialmente escolhe-se um perfil laminado W200x59,0. Este perfil foi serrado em seis partes/secções de 400 mm de comprimento conforme mostra a figura 18. As dimensões de cada secção estão representadas na figura 19.

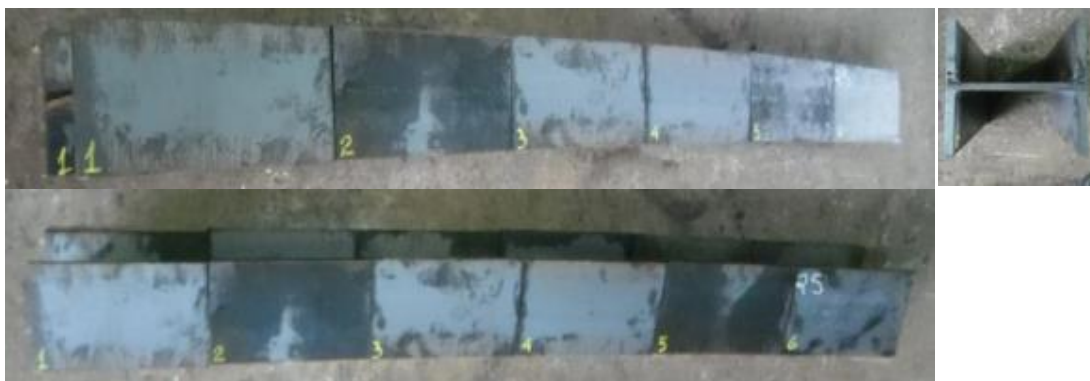


Figura 18 - Visão geral das secções feitas no perfil laminado

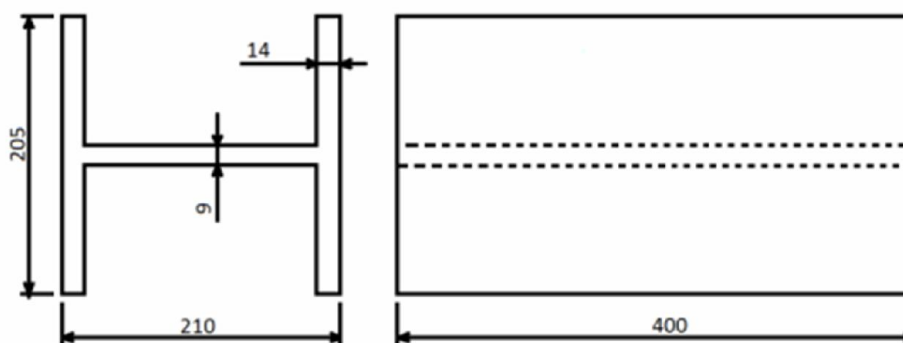


Figura 19 - Croqui de uma das secções do perfil

Cada uma das secções tem uma função específica no programa de testes conforme segue:

Secção 1: Nesta não houve aquecimento. Portanto, o objetivo aqui é verificar as propriedades mecânicas e metalúrgicas do material do perfil como laminado.

Secção 2: Foi aquecida e resfriada apenas uma vez.

Secção 3: Foi aquecida e resfriada duas vezes.

Secção 4: Foi aquecida e resfriada três vezes.

Secção 5: Foi aquecida e resfriada quatro vezes.

Secção 6: Foi aquecida e resfriada cinco vezes.

Os aquecimentos foram realizados todos sobre a mesma região do perfil. Conforme ilustra a figura 20 o aquecimento foi feito no formato V. A figura 20 mostra também uma representação das regiões de onde foram retirados os corpos de prova para os ensaios mecânicos e metalográficos.

Na secção 6 foram aquecidas duas regiões sendo uma em cada aba do perfil. De uma delas foram extraídos os corpos de prova para metalografia, microdureza e tração e da outra os corpos de prova para ensaio de metalografia, microdureza e Charpy.



Figura 20 - Esboço da região a ser aquecida e de onde serão removidos os corpos de prova

3.1 PROCEDIMENTO DE DESEMPENO

O item 8.5.5 da norma AWS D1.1 (AWS D1.1/D1.1M, 2010) especifica que, no processo de desempenho a quente, para aços temperados e revenidos a temperatura não deve exceder 600°C e para os demais aços não deve exceder 650°C. Essa limitação, estabelecida pela norma, visa prevenir que haja alterações microestruturais indesejadas.

Em cada ciclo de aquecimento e resfriamento a área, conforme ilustrado na figura 21, foi aquecida até aproximadamente 650°C sendo mantida esta temperatura por aproximadamente 2 minutos.



Figura 21 - Aquecimento em V com maçarico

3.1.1 Controle de Temperatura no Processo de Desempeno a Quente

Um dos parâmetros mais importantes e ainda difíceis de controlar é a temperatura do metal aquecido. Fatores que afetam a temperatura incluem o tamanho e tipo do orifício da tocha, a intensidade da chama, a velocidade do movimento da tocha a espessura e a configuração da peça.

A temperatura foi controlada utilizando-se um termômetro de contato digital, conforme ilustra a figura 22. Como o sensor deste instrumento demanda um certo tempo para sua estabilização, pode ocorrer que a temperatura durante o aquecimento, em alguns casos, tenha sido superior a 650 °C sendo difícil o controle desta variável devido às características do instrumento e também do sistema peça / tocha.



Figura 22 - Medição da temperatura de aquecimento com termômetro de contato

3.1.2 Resfriamento

Para o resfriamento, a partir da temperatura máxima, foi utilizada uma mangueira de água até que, em cada ciclo, a amostra se resfriasse até a temperatura ambiente (figura 23).



Figura 23 - Resfriamento brusco com água

3.2 CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE TRAÇÃO

Após concluídos os ciclos de aquecimento e resfriamento, foram removidas chapas de teste das mesas do perfil, incluindo nelas, para que sejam tracionadas, as regiões que sofreram aquecimento.

A figura 24 ilustra as chapas de teste de onde foram usinados, nas dimensões conforme ASTM A370 (ASTM A370, 2008), os corpos de prova para realização dos ensaios de tração.



Figura 24 - Chapas de teste para ensaio de tração.

3.3 CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE METALOGRAFIA E MICRODUREZA

Da região central das chapas de teste que, nas secções que foram aquecidas, incluem o vértice do aquecimento em V, foram retiradas amostras (figura 25) em cujos corpos de prova foram realizados os ensaios de micrografia e, em algumas amostras selecionadas, foi realizado o ensaio de microdureza.



Figura 25 - Chapas de teste. Da região central foram removidos os corpos de prova

Na preparação para os ensaios de micrografia e microdureza os corpos de prova, já cortados nas dimensões adequadas (10x10 mm) foram embutidos com baquelite, lixados com lixas de granulometrias 220, 320, 400, 600 e 1200 e então polidos utilizando-se alumina (figura 26). O ataque químico para revelação da microestrutura foi realizado com Nital.

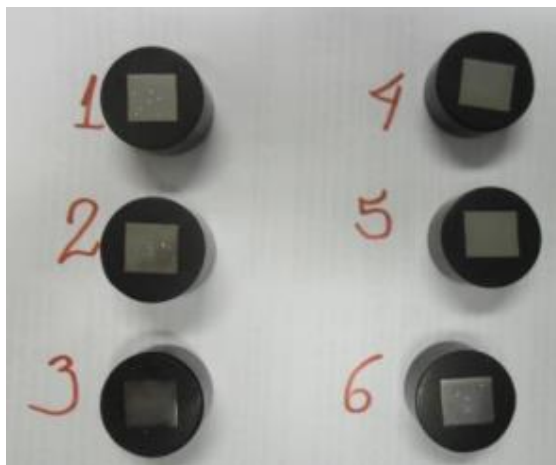


Figura 26 - Corpos de prova para ensaio metalográfico e de microdureza

3.4 CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE CHARPY

Com o objetivo de verificar a tenacidade do material, para a condição que pode ser considerada a mais crítica, aquela que passou por cinco ciclos de aquecimento/resfriamento, e para o material “como laminado” foi realizado o ensaio de impacto Charpy.

Foram removidos três corpos de prova da região que foi aquecida e três corpos de prova de uma região que não foi aquecida.

Os corpos de prova foram removidos na direção longitudinal em relação ao sentido de laminação, os entalhes foram perpendiculares à superfície e a temperatura de realização do ensaio foi 0° C. A norma de referência utilizada foi a ASTM A370-2008.



Figura 27 - Esboço da região a ser aquecida e de onde serão removidos os corpos de prova de Charpy e micrografia

3.5 EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS

Material de base: Perfil laminado W200x59,0 ASTM A572 grau 50

a) Para o processo de aquecimento das secções:

Maçarico com bico de aquecimento modelo 3H,

Gases: Mistura oxigênio e gás natural.

b) Para controle da temperatura

Termômetro de contato digital Gulton, Gulterm 1200

c) Para o ensaio de tração

Máquina de tração universal

d) Para os ensaios metalográficos

Politriz universal,

Microscópio ótico com sistema de aquisição de imagens.

e) para a medição de microdureza

Microdurômetro digital.

3.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE SEGURANÇA

O combustível utilizado no desempenho a quente é volátil e perigoso. Os cilindros de combustível devem ser sempre tratados com cuidado. Precauções de segurança incluíram:

Capa protetora sobre a cabeça de cada cilindro antes do transporte.

Examinar possíveis danos nos cilindros antes de cada utilização.

Verificar as linhas e acessórios para checar possíveis vazamentos ou danos antes de cada uso e que válvulas de retenção adequados estão instalados.

Além disso, o técnico utilizando o maçarico deve estar consciente da segurança em todos os momentos. Precauções incluem:

Usar óculos de proteção durante o aquecimento (uma lente nº3 é recomendada).

Ter cuidado de que a tocha aquecida é apontada em todos os momentos.

Usar luvas de proteção e vestuário.

Sempre estar em uma posição estável e segura antes de abrir as válvulas e acender a tocha.

Manter cilindros e mangueiras em posições seguras antes de iniciar o desempenho a quente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CONSIDERANDO AS PROPRIEDADES MECÂNICAS

Na tabela 01 estão os dados do certificado de qualidade emitido pelo fabricante do perfil enquanto que a tabela 02 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de tração e o relatório completo pode ser verificado no anexo 01.

Tabela 01 - Propriedades do perfil “como laminado” mencionadas no certificado do material

Dados do certificado	Resistência à tração (MPa)	à Limite de resistência ao escoamento (MPa)	Alongamento (%)
Amostra 1	536	419	26,0
Amostra 2	533	403	26,5

Tabela 02 - Resultados obtidos nos ensaios de tração realizados

Amostra/ Especificação	Resistência à tração (MPa)	Limite de resistência ao escoamento (MPa)	Alongamento (%)
CP01	552,6	386,2	39,0
CP02	598,0	372,8	*
CP03	586,3	374,6	*
CP04	599,2	420,2	*
CP05	565,5	389,1	31,0
CP06	564,5	416,0	*
ASTM A572 gr50	450,0 min	345,0 min	21,0 min

* A determinação não foi possível porque rompeu “fora 1/3 médio” (ver relatório do anexo 01).

Analisando os dados da norma ASTM A572, do certificado do material e dos resultados dos ensaios de tração realizados pode-se verificar que não houve comprometimento da resistência ao escoamento e à tração considerando que, em nenhum dos casos, ficou abaixo dos valores mínimos especificados pela norma.

A resistência à tração aumentou em todos os corpos de prova que foram aquecidos, em relação ao corpo de prova do material “como laminado”. Verifica-se que ela aumentou do CP02, que sofreu um ciclo de aquecimento/resfriamento, até no CP04 que sofreu 3 ciclos. Nos CPs 05 e 06, que respectivamente sofreram 4 e 5 ciclos a resistência a tração diminuiu porém, ficou ainda acima da resistência do material original.

O limite de resistência ao escoamento, em relação ao material “como laminado”, diminuiu para os CPs 02 e 03 que foram aquecidos e resfriados 1 e 2 vezes respectivamente, e aumentou para os CPs 04, 05 e 06.

O alongamento só foi possível de se medir nos CP01 e 05 sendo que diminui de 39% (no CP01 material “como laminado”) para 31% (no CP05 que passou por 4 ciclos de aquecimento/resfriamento), porém ambos estão acima do mínimo (21%) estabelecido pela norma ASTM A572 para o grau 50.

Tabela 03 - Resultados obtidos no ensaio de Charpy

CP	Condição	Expansão lateral (mm)	Energia absorvida (J)	
CP06-1	Amostra	0,48	18	Média 18,6
CP06-2	que foi	0,56	26	
CP06-3	aquecida	0,18	12	
CP06-4	Amostra	0,34	16	Média 16
CP06-5	como	0,23	10	
CP06-5	laminado	0,42	22	

Obs.: todos os dados dos ensaios de Charpy estão no relatório do anexo 01

A tabela 03 apresenta os resultados dos ensaios de Charpy, que foram realizados para o material em que foram realizados cinco ciclos de aquecimento/resfriamento e para o material que não foi aquecido. O perfil de teste foi o perfil 06 representado na tabela 03 como CP06.

Analisando os resultados obtidos podemos verificar que não houve alterações significativas na tenacidade do material comparando as condições “como laminado” e “com aquecimento”.

4.2 CONSIDERANDO AS PROPRIEDADES METALÚRGICAS

As figuras 28 até 52 apresentam as imagens das microestruturas obtidas nos ensaios metalográficos. Como o corpo prova CP01 corresponde ao material “como laminado” apenas a figura 28 é suficiente para representar a microestrutura média.

Os demais corpos de prova, CP02 até CP06, sofreram processo de desempenho a quente portanto, neles foram aplicados ciclos de aquecimento/resfriamento. Por isso, para cada CP, foram analisadas e fotografadas as regiões: próxima a superfície que foi aquecida, próxima ao centro da espessura e próxima a superfície oposta à que foi aquecida.

Imagem da microestrutura do corpo de prova CP01

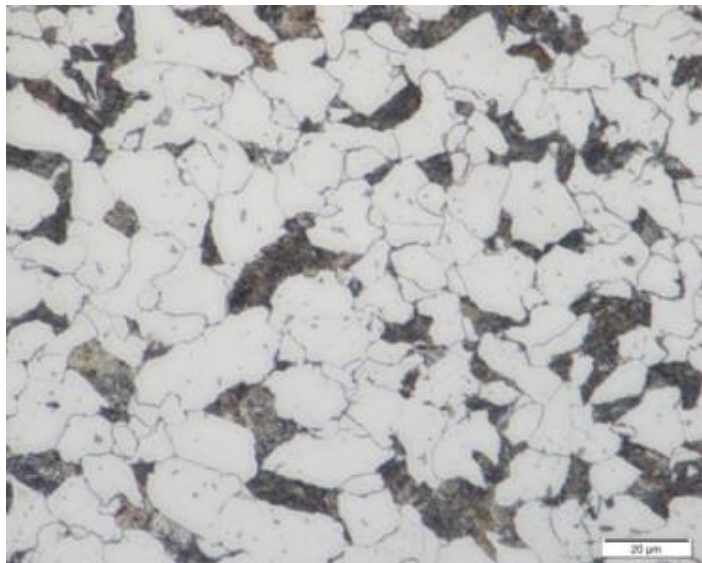


Figura 28 - Microestrutura do material como laminado (ampliação 100x)

- Imagens das microestruturas do corpo de prova CP02

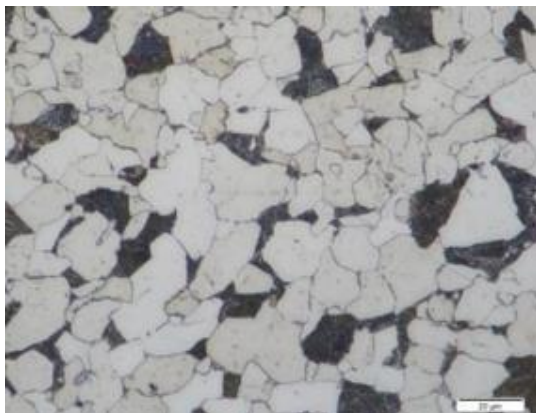


Figura 29 - Microestrutura do material próxima a superfície oposta à região aquecida (ampliação 100x)

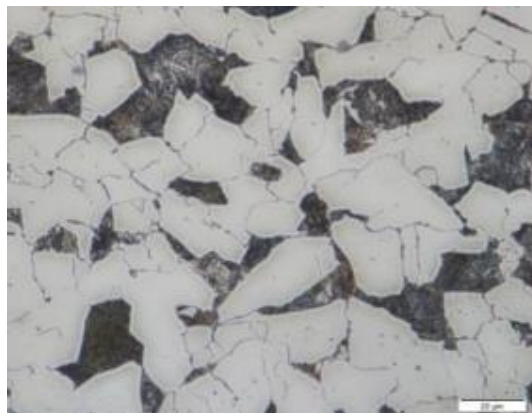


Figura 30 - Microestrutura do material próxima à região central da espessura do CP (ampliação 100x)

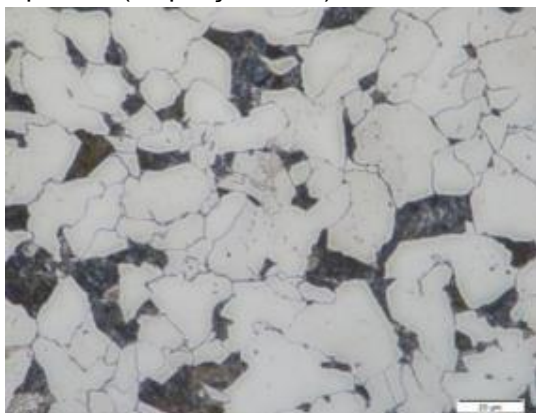


Figura 31 - Microestrutura do material a aproximadamente 4 mm da superfície aquecida (ampliação 100x)

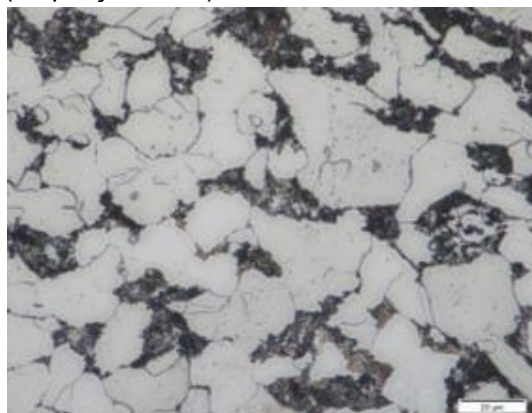


Figura 32 - Microestrutura do material a aproximadamente 3 mm da superfície aquecida (ampliação 100x)

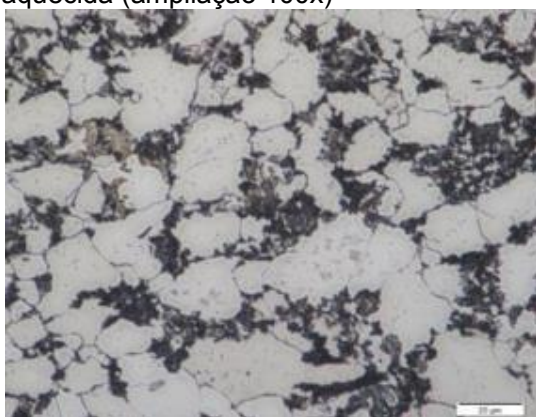


Figura 33 - Microestrutura do material a aproximadamente 2 mm da superfície aquecida (ampliação 100x)

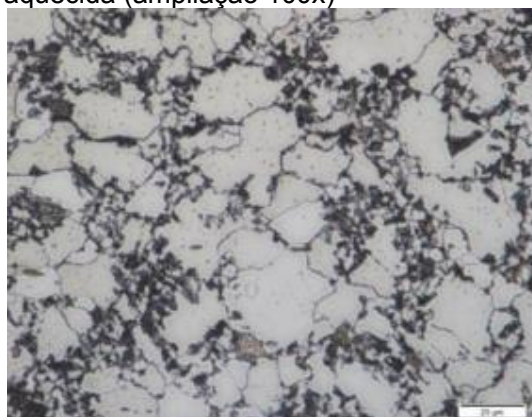


Figura 34 - Microestrutura do material a aproximadamente 1 mm da superfície aquecida (ampliação 100x)

- Imagens das microestruturas do corpo de prova CP03

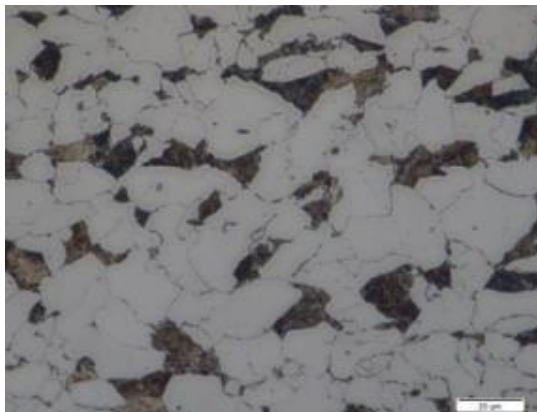


Figura 35 - Microestrutura do material próxima a superfície oposta à região aquecida (ampliação 100x)

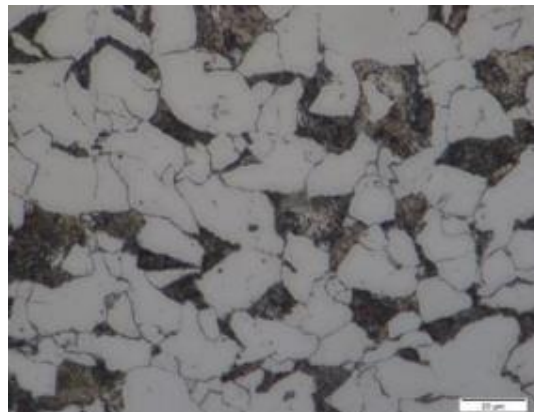


Figura 36 - Microestrutura do material próxima à região central da espessura do CP (ampliação 100x)

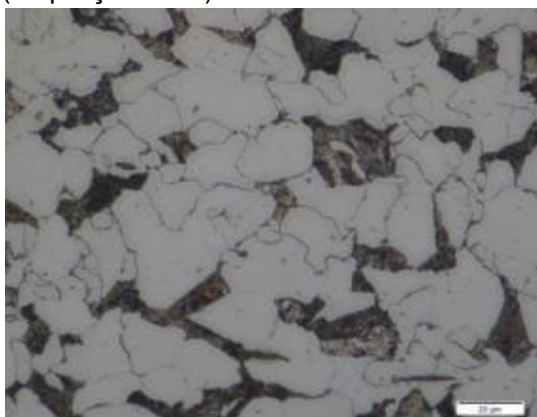


Figura 37 - Microestrutura do material a aproximadamente 4 mm da superfície aquecida (ampliação 100x)

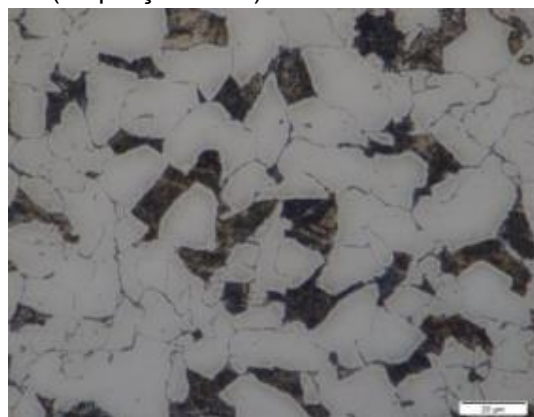


Figura 38 - Microestrutura do material a aproximadamente 3 mm da superfície aquecida (ampliação 100x)

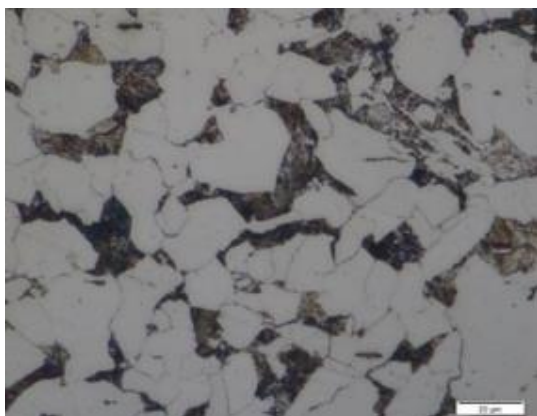


Figura 39 - Microestrutura do material a aproximadamente 2 mm da superfície aquecida (ampliação 100x)

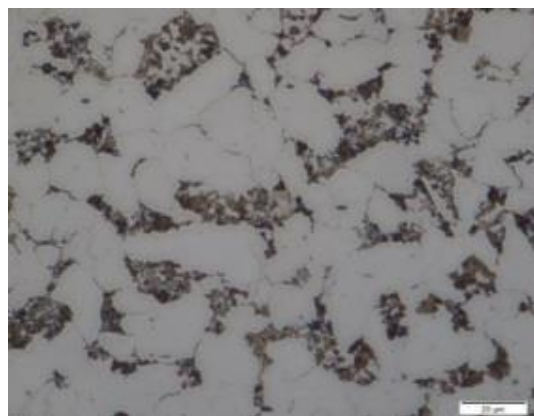


Figura 40 - Microestrutura do material a aproximadamente 1 mm da superfície aquecida (ampliação 100x)

- Imagens das microestruturas do corpo de prova CP04

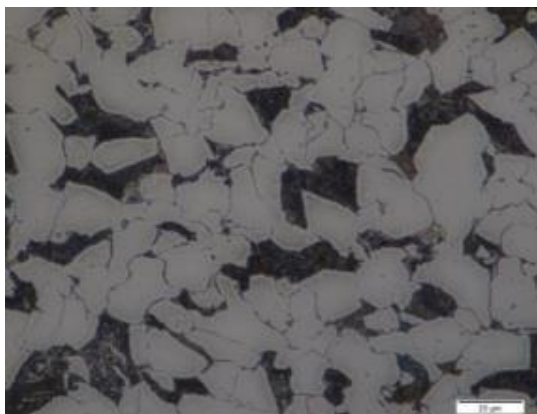


Figura 41 - Microestrutura do material próxima a superfície oposta à região aquecida (ampliação 100x)



Figura 42 - Microestrutura do material próxima à região central da espessura do CP (ampliação 100x)

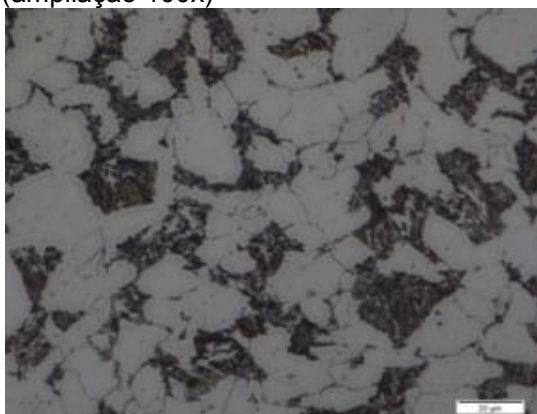


Figura 43 - Microestrutura do material a aproximadamente 4 mm da superfície aquecida (ampliação 100x)

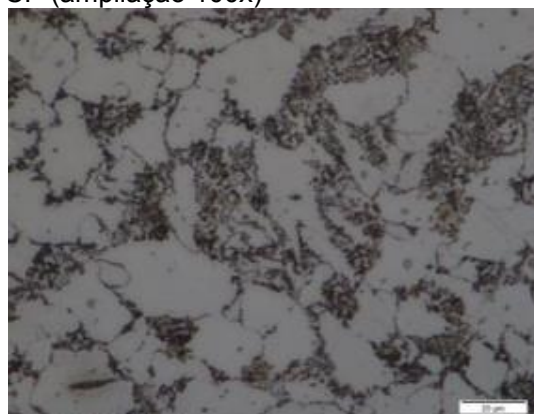


Figura 44 - Microestrutura do material a aproximadamente 3 mm da superfície aquecida (ampliação 100x)

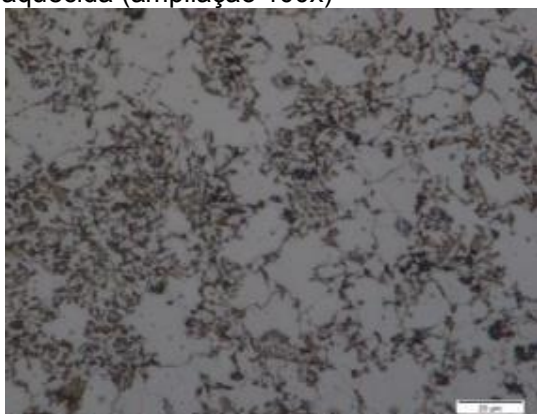


Figura 45 - Microestrutura do material a aproximadamente 2 mm da superfície aquecida (ampliação 100x)



Figura 46 - Microestrutura do material a aproximadamente 1 mm da superfície aquecida (ampliação 100x)

- Imagens das microestruturas do corpo de prova CP06



Figura 47 - Microestrutura do material próxima a superfície oposta à região aquecida (ampliação 100x)

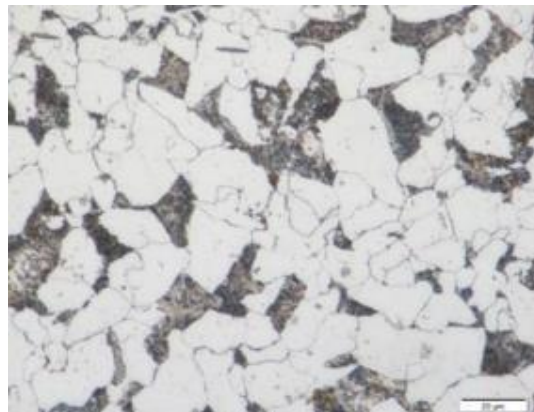


Figura 48 - Microestrutura do material próxima à região central da espessura do CP (ampliação 100x)

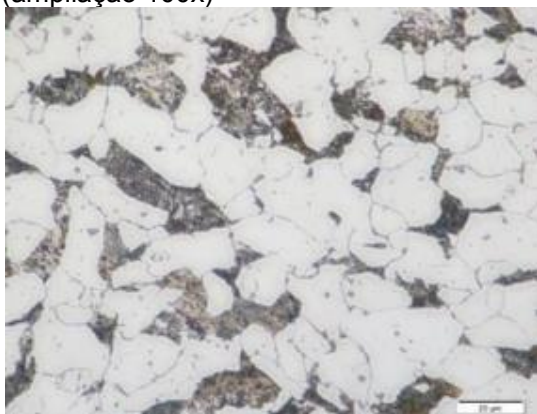


Figura 49 - Microestrutura do material a aproximadamente 4 mm da superfície aquecida (ampliação 100x)

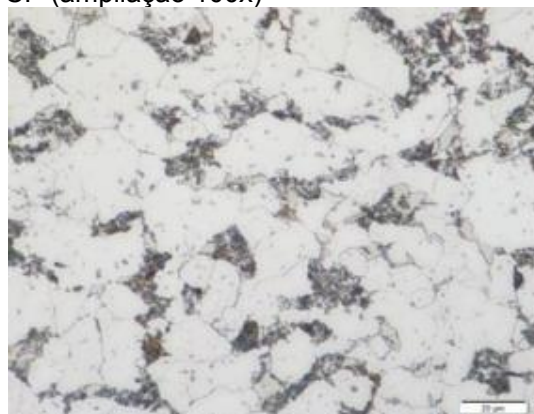


Figura 50 - Microestrutura do material a aproximadamente 3 mm da superfície aquecida (ampliação 100x)

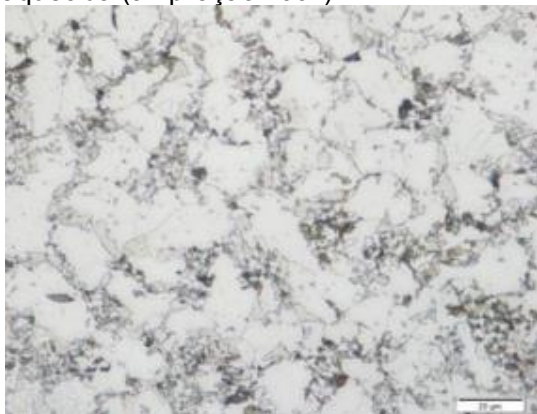


Figura 51 - Microestrutura do material a aproximadamente 2 mm da superfície aquecida (ampliação 100x)

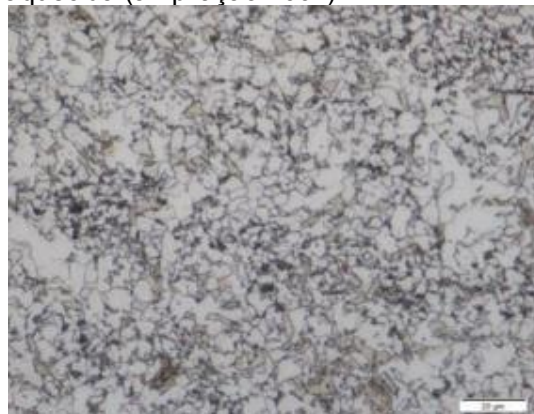


Figura 52 - Microestrutura do material a aproximadamente 1 mm da superfície aquecida (ampliação 100x)

Analisando as microestruturas podemos verificar que a do CP01, do material como laminado, é típica composta de ferrita e perlita.

Para todos os demais CPs, cujos materiais sofreram ciclos de aquecimento/resfriamento, houve refino de grão e, possivelmente, precipitação de carbonetos nas regiões próximas às superfícies que foram aquecidas. Parte desses resultados podem ser consequência à um possível aquecimento acima da temperatura de transformação, nas regiões próximas às superfícies aquecidas. Esse aquecimento excessivo, que pode ter ocorrido, se deve às dificuldades de controle da temperatura durante o aquecimento como, por exemplo, influência da geometria da peça, movimentação e intensidade da chama do maçarico, resposta relativamente lenta do sensor do termômetro de contato, etc.

Os corpos de prova de maior interesse nesse trabalho são os CP02 e CP03 que sofreram respectivamente 1 e 2 ciclos de aquecimento/resfriamento porque, na prática em geral se aquece uma única região da peça no máximo duas vezes. Verifica-se que para esses CPs (figuras 29 a 40) a microestrutura não apresentou variação tão significativa em relação à original “como laminado”. No corpo de prova CP05 não foi realizada a metalografia.

4.3 CONSIDERANDO O ENSAIO DE MICRODUREZA

Os valores de microdureza apresentados abaixo na tabela 04 são valores médios, a partir de três medições realizadas em cada região.

Tabela 04 - Resultado dos ensaios de microdureza Vickers (HV)

CPs / Região analisada	* CP01 (HV)	CP02 (HV)	CP03 (HV)	CP06 (HV)	** CP06 (HV)
Região próxima à superfície que foi aquecida	-	197	204	211	193
Região próxima ao centro da espessura do CP	176	181	193	198	178
Região oposta à superfície que foi aquecida	-	180	189	192	178

* o CP01 foi ensaiado “como laminado” (não houve aquecimento)
 ** Esses valores são da região próxima de onde foram extraídos os corpos de prova de Charpy (anexo 01)

Analisando os valores de microdureza obtidos podemos verificar que houve “leve” endurecimento nos corpos de prova que sofreram ciclos de aquecimento/resfriamento. Esse endurecimento foi gradativo, sendo maior nas regiões próximas às superfícies que foram aquecidas, e se deve ao refino de grãos e possivelmente à formação de carbonetos nessas regiões.

CONCLUSÕES

Os ensaios de tração realizados mostraram que não houve comprometimento da resistência ao escoamento e do limite de resistência à tração considerando que, em nenhum dos casos, ficou abaixo dos valores mínimos especificados pela norma ASTM A572. A resistência à tração aumentou em todos os corpos de prova que foram aquecidos, em relação ao corpo de prova do material original “como laminado”. O limite de resistência ao escoamento, em relação ao material “como laminado”, diminuiu para os CPs 02 e 03 que foram aquecidos e resfriados 1 e 2 vezes respectivamente, e aumentou para os demais CPs que sofreram 3, 4 e 5 ciclos de aquecimento/resfriamento.

Para alguns corpos de prova, por exemplo CP04 e CP06, nas regiões próximas às superfícies aquecidas e resfriadas bruscamente, houve refino de grão e, possivelmente, precipitação de carbonetos. Parte desses resultados pode ser consequência a um possível aquecimento acima da temperatura de transformação.

Houve, considerando os resultados de microdureza, “leve” endurecimento nas regiões próximas às superfícies que foram aquecidas, nos corpos de prova que sofreram ciclos de aquecimento/resfriamento.

Considerando as limitações das condições de testes e processo, com base nos resultados obtidos, a partir dos ensaios de tração, Charpy, metalografia e microdureza realizados, para este material utilizado, pode-se concluir que o processo de desempenho a quente em estruturas novas, ou seja, que não tenham sido previamente danificadas, pode ser utilizado com segurança.

RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Utilizando-se procedimentos de desempenho a quente, similares aos aqui utilizados, recomenda-se uma análise mais abrangente do comportamento do material para aplicações que envolvam carregamentos cíclicos e.g. vigas de rolamento.

Pode ser também analisado o efeito do desempenho a quente em estruturas que, por algum motivo, tenham sido previamente danificadas e que possam ser recuperadas através desse processo.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM A370 - Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. 2008

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM A572/A572M - Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel. 2007

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

CALLISTER Jr., W. D., Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 7ª edição, Rio de Janeiro, LTC 2012.

GUIDE for heat-straightening of damaged steel bridge members. FHWA. Disponível em: < <http://www.fhwa.dot.gov/bridge/steel>>. Acesso em 04 fev 2013

HIGH-Strength Low-Alloy Steels. ASM International. Disponível em: <<http://www.asminternational.org/content/ASM/StoreFiles>>. Acesso em 23 jun 2013

OKUMURA, T., TANIGUCHI, C. Engenharia de Soldagem e Aplicações, Rio de Janeiro, LTC 1982.

ANEXOS

ANEXO I – RELATÓRIOS DOS ENSAIOS



RELATÓRIO DE INSPEÇÃO N° 12570/2013

1 – CLIENTE: Eng° ELIAS

2 – DATA: 10 de Junho de 2013.

3 – OBJETIVO:

Determinar propriedades mecânicas de materiais constituídos de “Chapas de aço” utilizando a técnica de ensaios mecânicos de tração.

4 – IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS:

S-38777: Chapa ASTM A 572 – corpo de prova 01

S-38778: Chapa ASTM A 572 – corpo de prova 02

S-38779: Chapa ASTM A 572 – corpo de prova 03

S-38780: Chapa ASTM A 572 – corpo de prova 04

S-38781: Chapa ASTM A 572 – corpo de prova 05

S-38782: Chapa ASTM A 572 – corpo de prova 06

5 – METODOLOGIA ADOTADA/RESULTADOS:

5.1 - ENSAIOS MECÂNICOS

Os corpos de prova foram removidos e usinados pelo cliente conforme norma ASTM A-370.

Os resultados obtidos nos ensaios de tração estão apresentados na tabela 01 e comparados à norma ASTM A 572.

Tabela 01 – Resultados dos ensaios de tração.

Amostra/Especificação	Resistência à Tração (MPa)	Limite de Resistência ao Escoamento (MPa)	Alongamento (%)
S-38777 – CP 01	552,6	386,2	39,0
S-38778 – CP 02	598,0	372,8	Fora 1/3 médio
S-38777 – CP 03	586,3	374,6	Fora 1/3 médio
S-38778 – CP 04	599,2	420,2	Fora 1/3 médio
S-38777 – CP 05	565,5	389,1	31,0
S-38778 – CP 06	564,5	416,0	Fora 1/3 médio
ASTM A 572 Grau 50	450,0 _{mínimo}	345,0 _{mínimo}	21,0 _{mínimo}
ASTM A 572 Grau 60	520,0 _{mínimo}	415,0 _{mínimo}	18,0 _{mínimo}

Ângela Nardelli Allenstein, MSc.
CREA/PR 85206/D

Cesar Lucio Molitz Allenstein, MSc.
CREA/PR 2276 TD

Página 1 de 1

Os resultados apresentados no presente documento têm significado restrito e se aplicam somente à amostra ensaiada. A sua reprodução, total ou parcial, só poderá ser realizada mediante prévia autorização do laboratório.

Rua Wanda dos Santos Mullmann, 1233 - Pinhais PR - CEP 83323-400 - Fone/ Fax: 55 41 3033 5833 - 3033 0230
Spectroscan@spectroscan.com.br - www.spectroscan.com.br

1 – CLIENTE: Eng° ELIAS

2 – DATA: 12 de Setembro de 2013.

3 – OBJETIVO:

Caracterizar material identificado pelo cliente como chapa, aplicando as técnicas de análise metalográfica, medições de dureza e ensaios mecânicos de charpy.

Os ensaios foram conduzidos em chapa de aço carbono na condição de como recebida e outra submetida a aquecimento superficial a 650°C.

3.1- NORMA DE REFERÊNCIA

- ASTM A – 370 - Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products

4 – IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS:

S-39879 – Chapa com aquecimento à 650°C – Metalografia e dureza

S-39880 – Chapa com aquecimento à 650°C – Ensaio de impacto

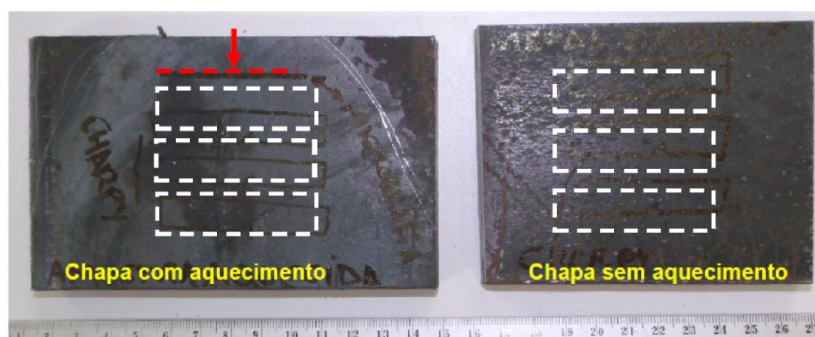
S-39881 – Chapa com aquecimento à 650°C – Ensaio de impacto

S-39882 – Chapa com aquecimento à 650°C – Ensaio de impacto

S-39883 – Chapa sem aquecimento – Ensaio de impacto

S-39884 – Chapa sem aquecimento – Ensaio de impacto

S-39885 – Chapa sem aquecimento – Ensaio de impacto



Fotografia 01 – Peças como recebida para realização dos ensaios. Em branco local de remoção dos corpos de prova para ensaio de impacto charpy e, em vermelho local da metalografia, conforme indicação do cliente.

5 – METODOLOGIA APLICADA/RESULTADOS OBTIDOS

5.1 - ANÁLISE METALOGRÁFICA

A amostra, S-39879, foi removida como indicado na fotografia 01 sendo preparada metalograficamente por lixamento até a grana 1200 e polida em suspensão de alumina. O ataque foi realizado com reagente nital 2%.

O Anexo I apresenta as microestruturas obtidas para cada região analisada.

5.2 - ENSAIO DE MICRODUREZA

Os ensaios foram realizados na mesma amostra da análise metalográfica utilizando um microdurômetro de bancada na escala Vickers com carga de 1 kgf (HV₁) sendo os resultados convertidos para escala Rockwell B (HRB) utilizando a norma ASTM E140.

Os resultados são apresentados na tabela 01.

Tabela 01 – Valores de dureza obtidos para a amostra S-39879.

Região	Distância da superfície (mm)	Dureza (HV ₁)	Dureza (HRB)
Superfície da peça com aquecimento	0,05	189	91
	0,50	193	92
	1,00	193	92
Superfície da peça sem aquecimento	0,05	178	88
	0,50	178	88
	1,00	177	88
Meia espessura		178 – 178 - 178	88

5.3 - ENSAIO DE IMPACTO CHARPY

As amostras foram removidas conforme indicado na fotografia 01 e entalhadas perpendicularmente a superfície da chapa.

A usinagem e os ensaios foram realizados conforme norma ASTM A 370.

Temperatura de realização do teste: 0°C.

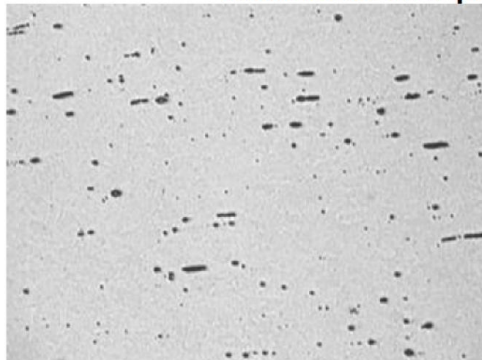
Tabela 02 – Resultados obtidos nos ensaios.

Amostras	Remoção das amostras	L ^{-2,5} (mm)	L/2 ^{±1,0} (mm)	2 ^{±0,025} (mm)	10 ^{±0,075} (mm) "A"	10 ^{±0,075} (mm) "B"	Expansão Lateral (mm)	45 ^{±2} (graus)	Energia Absorvida (J)	
39880	Chapa com aquecimento	55,0	27,5	2,000	10,037	10,052	0,48	45	18	Média 18,6
39881		55,0	27,5	1,998	10,054	10,050	0,56	45	26	
39882		55,0	27,5	1,997	10,046	10,049	0,18	45	12	
39883	Chapa sem aquecimento	55,0	27,5	1,997	10,033	10,036	0,34	45	16	Média 16
39884		55,0	27,5	1,998	10,044	10,013	0,23	45	10	
39885		55,0	27,5	1,997	10,019	10,045	0,42	45	22	

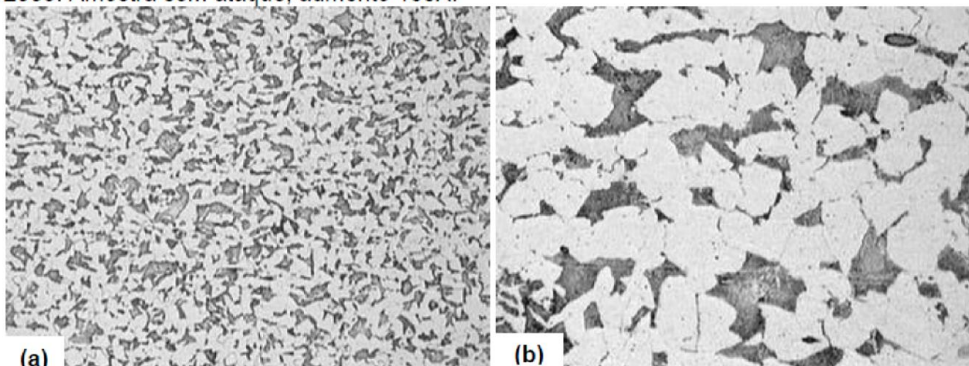
Ângela Nardelli Allenstein, M.Sc.
CREA/PR 85206/D

Cesar Lucio Molitz Allenstein, M.Sc.
CREA/PR 2276 TD

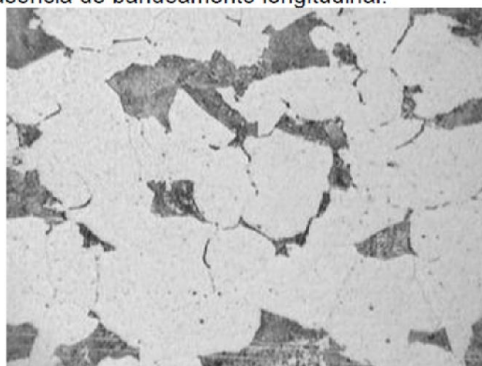
RELATÓRIO DE INSPEÇÃO N° 12859/2013
ANEXO I – MICROGRAFIAS
S-39879: CHAPA DE AÇO
Submetida ao aquecimento superficial



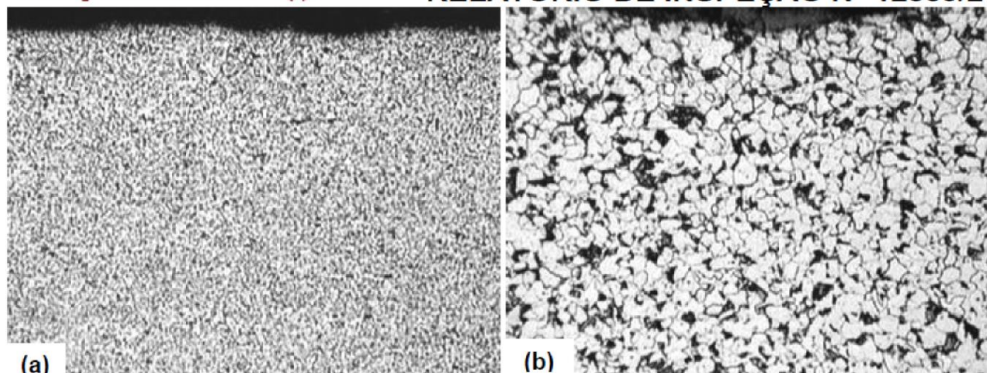
Micrografia 1: Amostra S-39879 - Seção longitudinal - Meia espessura - Distribuição de inclusões não metálicas óxido globular (série grossa) do tipo A, nível 3 conforme norma NBR NM 88/2000. Amostra sem ataque, aumento 100X.



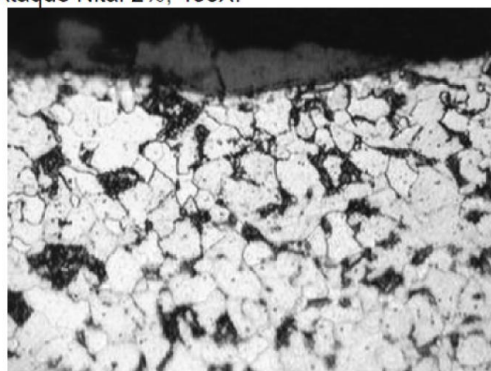
Micrografia 2: Amostra S-39879 - Seção longitudinal - Meia espessura - (a) Microestrutura com matriz ferrítica com perlita. Tamanho de grão ASTM 8. Ataque Nital 2%, 100X. (b) Detalhe de (a). Ataque Nital 2%, 400X. Ausência de bandejamento longitudinal.



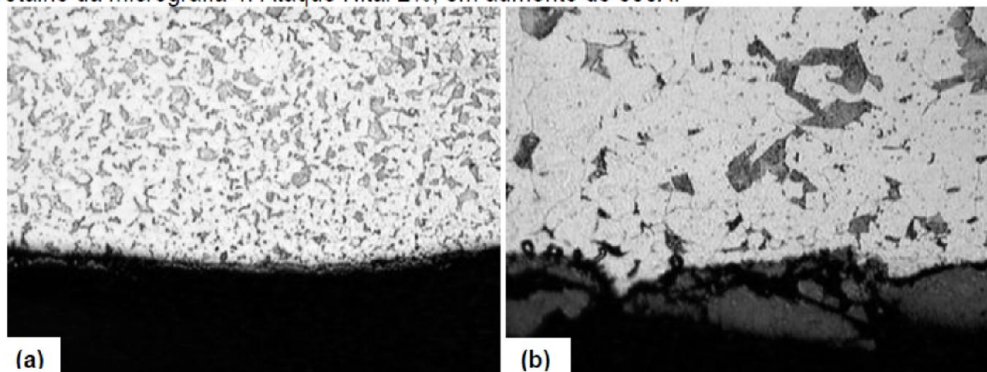
Micrografia 3: Amostra S-39879 - Seção longitudinal - Detalhe da micrografia 2. Ataque Nital 2%, em aumento de 800X.



Micrografia 4: Amostra S-39879 - Seção longitudinal – Próximo à superfície com aquecimento
 (a) Microestrutura com matriz ferrítica com perlita. Tamanho de grãos ASTM 10. Ataque Nital 2%, 100X. (b) Detalhe de (a). Ataque Nital 2%, 400X.



Micrografia 5: Amostra S-39879 - Seção longitudinal – próximo à superfície com aquecimento
 - Detalhe da micrografia 4. Ataque Nital 2%, em aumento de 800X.



Micrografia 6: Amostra S-39879 - Seção longitudinal – Próximo à superfície sem aquecimento
 (a) Microestrutura com matriz ferrítica com perlita. Tamanho de grãos ASTM 8. Ataque Nital 2%, 100X. (b) Detalhe de (a). Ataque Nital 2%, 400X.

Ângela Nardelli Allenstein, M.Sc.
 CREA/PR 85206/D

Cesar Lucio Molitz Allenstein, M.Sc.
 CREA/PR 2276 TD

ANEXO II – CERTIFICADO DO PERFIL LAMINADO UTILIZADO



GERDAU

GERDAU AÇOMINAS S.A.

USINA - STEEL WORKS
 RODOVIA MG40 - KM 7 / FAZ. CADETE
 OURO BRANCO - CEP: 36020-009 - MG
 MINAS GERAIS - BRASIL
 C. Postal: 0901 - FAX: 58.31.3748-3233

**CERTIFICADO DE QUALIDADE
 MILL SHEET CERTIFICATE**

Certificamos que o produto está de acordo com os requisitos da norma técnica citada.
 We hereby certify that the product is in accordance with the requirements of the below mentioned technical specifications.
 Para a mesma proteção de fornecedor e cliente, este certificado tem caráter confidencial e sua transcrição total ou parcial, assim como cópias sem gráficas são proibidas, exceto quando autorizadas por escrito, pela Gerdau Açominas.
 As a mutual protection to customer and supplier, all reports are submitted as a confidential property, authorization for publication or transmittal or others form or regarding our reports is reserved pending our written approval.

Cliente / Customer BRAFER CONSTRUÇÕES METÁLICAS SA AVENIDA DAS ARAUCARIAS 40-BARUGUI ARAUCARIA-PR-83707-000-BR	Nº Ordem - Order 17211519 NF 772787
--	--

Página / Page
1 / 1

DESIGNAÇÃO DO PRODUTO SPECIFICATION/PRODUCT	CORTEÇA Sheet	CP	LE	LR	ALONG	C	MG	SL	P	S	ALT	RD	V
PERFIL H A-972 GR 50 9000X59,0 - 12,0 N	4607758	01	419	536	26,0	0,17	1,34	0,16	0,036	0,037	0,002	0,019	0,003
	02	403	533	26,5									
PERFIL H A572 GR 50 90310X79,0 - 12 M	4607780	01	436	549	27,0	0,18	1,35	0,21	0,028	0,018	0,003	0,023	0,003
	02	439	548	25,0									


NÍVEL DE LIXAÇÃO DE SUPERFÍCIE CONFORME NORMA ISO 8501-1:
 SURF LEVEL ACCORDING TO ISO STANDARD 8501-1: LEVEL C MAXIMUM.
 Foram utilizados corpos-de-prova com L₀ = 200mm.
 It were used full size specimens (L₀ = 200mm)

INSPECIONADO

APROVADO
 REPROVADO

INSPEÇÃO
 BRAFER CONSTRUÇÕES METÁLICAS SA

I - 2923, 2924

Códigos das propriedades mecânicas Codes of the mechanical properties CP - SN - Corpo de prova - Specimen Number ALONG - ELONG Alongamento - Elongation Dobl - BT Dobramento - Bending test LE - YS Limite de escoamento - Yield strength LR - TS Limite de resistência - Tensile Strength L ₀ E ₀ R ₀ - YOUTS Relação (F ₀ /E ₀), Yield strength/Tensile strength	Perfis mecânicos / Structural shapes - norma standard ASTM A-6 06a QUALIDADE E TECNOLOGIA A SERVIÇO DE Nossos CLIENTES QUALITY AND TECHNOLOGY TO SERVE OUR CUSTOMERS  Rua A. Avenida São CREA 16.313 Companhia de Aço e Tubos / Products Division 15.06.2012 Data de emissão / Date of issue
---	--

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Propriedades do perfil “como laminado” mencionadas no certificado do material	38
Tabela 02 - Resultados obtidos nos ensaios de tração realizados	38
Tabela 03 - Resultados obtidos no ensaio de Charpy	39
Tabela 04 - Resultado dos ensaios de microdureza Vickers (HV)	45