

Daniel Gustavo Casemiro da Rocha

Eng. de Controle e Automação Industrial, Universidade Paulista -

UNIP, 2001.

**CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA DE UM
SEGMENTO DE TRILHO SOLDADO PELO
PROCESSO DE ALUMINOTERMIA NA
MONTAGEM E MANUTENÇÃO DE LINHA
METRO-FERROVIÁRIA**

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para conclusão de curso de Especialização.

Área de Concentração: Engenharia da Soldagem

Orientador: Prof. Dr. Sergio Duarte Brandi

São Paulo

Março/2012

Daniel Gustavo Casemiro da Rocha

**CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA DE UM
SEGMENTO DE TRILHO SOLDADO PELO
PROCESSO DE ALUMINOTERMIA NA
MONTAGEM E MANUTENÇÃO DE LINHA
METRO-FERROVIÁRIA**

Monografia apresentada ao Programa de
Educação Continuada em Engenharia da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
conclusão de curso de Especialização.

São Paulo
Março/2012

Daniel Gustavo Casemiro da Rocha

Eng. de Controle e Automação Industrial, Universidade Paulista -
UNIP, 2001.

**CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA DE UM
SEGMENTO DE TRILHO SOLDADO PELO
PROCESSO DE ALUMINOTERMIA NA
MONTAGEM E MANUTENÇÃO DE LINHA
METRO-FERROVIÁRIA**

Monografia apresentada ao Programa de
Educação Continuada em Engenharia da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
conclusão de curso de Especialização.

Área de Concentração: Engenharia da Soldagem

Orientador: Prof. Dr. Sergio Duarte Brandi

São Paulo
Março/2012

*"Lá vai o trem com o menino. Lá vai a vida
a rodar. Lá vai ciranda e destino. Cidade e
noite a girar. Lá vai o trem sem destino. Pro
dia novo encontrar. Correndo vai pela terra.
Vai pela serra. Vai pelo mar. Cantando pela
serra do luar. Correndo entre as estrelas a
voar. No ar, no ar, no ar, no ar..."*

Heitor Villa Lobos – Trenzinho Caipira.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, que sempre estiveram ao meu lado e que acreditaram e me apoiaram neste desejo.

Agradeço ainda a todos os professores, colegas e amigos que, de muitas formas, me incentivaram e ajudaram para que fosse possível a concretização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado saúde e iluminado meu caminho nos momentos mais felizes que tive na vida.

Ao meu pai Sérgio que, diante das minhas fraquezas e momentos de euforia, me deu conselhos, me incentivou e me levantou. Meu agradecimento por ser esse amigo, conselheiro, a pessoa que me orgulho de ter como pai.

A minha mãe que, com suas palavras serenas e de apoio, me fizeram caminhar nos caminhos da luz. Agradeço pelo carinho e dedicação ao estar sempre a meu lado, não me deixando desistir e mostrando que sou capaz de chegar onde desejo. Ela, sem dúvida, foi quem me deu o maior incentivo para concluir esse curso.

Aos meus amigos que, mesmo em momentos de descontração ou quando não acreditavam que eu estava em aula todas as sextas e sábados, me incentivaram.

Aos colegas de turma que, diante das minhas dificuldades, estiveram presentes e compartilharam seus conhecimentos técnicos a fim de me ajudar, agregando conhecimento em diversos assuntos relacionados às disciplinas do curso.

Aos Senhores Camilo Muradas Sotelo e Eucélio Estevam Silva, meus superiores na Associação Brasileira de Máquinas e Equipamentos – ABIMAQ, que compreenderam as minhas ausências para tratar do assunto deste trabalho.

A Companhia do Metropolitano de São Paulo – METRO, pela vista que me proporcionou, a fim de conhecer melhor o processo descrito nesse trabalho e ainda por ter doado uma junta soldada – apresentada aqui como objeto de estudo.

As empresas Indústria e Comércio Metalúrgica Atlas S/A. e Mello S.A. Máquinas e Equipamentos, por terem prestado serviço e cedido tempo e equipamento que me auxiliaram no preparo da amostra a ser estudada.

Ao Dany Andrade Centeno que pôde dedicar momentos de seu tempo e conhecimento a fim de me auxiliar nos procedimentos práticos realizados neste estudo.

Ao meu orientador Professor Sergio Duarte Brandi que, diante de todo seu conhecimento e mesmo com um acúmulo de tarefas, me atendeu e me orientou para que pudesse realizar essa monografia.

CURRICULUM VITAE

MBA em Gerenciamento de Projetos – ITA – Instituto Tecnológico de Aeronáutica (Incompleto)

Engenharia de Controle e Automação Industrial (Mecatrônica) - UNIP – Universidade Paulista (Dez./2001)

Técnico em Mecânica de Manutenção Aeronáutica (Grupo Motopropulsor) - EWM (Dez./1997)

Profissional

Gerente Executivo de Câmaras Setoriais (Jan./2011- Até a presente data)
ABIMAQ – Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos

Coordenador Técnico - Engenharia (Ago./2007 – Dez./2010)
ABIMAQ – Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos

Analista Pleno de Difusão Tecnológica - Engenharia (Jan./2002 – Jul./2007)
ABIMAQ – Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos

RESUMO

A soldagem de trilhos ferroviários é um tema pouco estudado e bastante importante para o país. Por meio de escassas pesquisas, foi observado que existem dois tipos distintos: *a soldagem por centelhamento*, usada para soldar comprimentos grandes de segmentos de trilho; e a *soldagem aluminotérmica* que, devido a sua simplicidade e eficiência, há anos vem sendo utilizada para a manutenção de trilhos.

Por essa razão, este trabalho tem como objetivo analisar de maneira mais detalhada as características metalográficas de uma junta soldada pelo processo de aluminotermia.

Foi utilizado, para a pesquisa, um segmento de trilho cedido pela Companhia do Metropolitano de São Paulo – METRO, do tipo "Vignole" e de perfil TR 57. A análise da solda seguiu as recomendações da norma técnica Arema – American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association. Dentre os ensaios solicitados na aludida norma, foram realizados o ensaio metalográfico e o teste de dureza Brinell – a fim de atestar a qualidade da junta soldada.

Os resultados apresentados mostram a alteração microestrutural da junta, e o gráfico de dureza mostra a variação estrutural do aço, causada pelo calor gerado durante reação química da soldagem.

ABSTRACT

The welding of railway tracks is a not very studied topic and very important for Brazil. Through a quick literature research it was noted two welding process types: a percussion welding, used to weld lengths of large segments of railway tracks, and aluminothermic welding, which has been used to maintain its simplicity and efficiency to joint parts or maintenance of rail segments.

Therefore, the objective of this work is to study the metallographic characteristics of a welded joint by aluminothermic process.

For this, a segment of a "Vignole" profile TR 57 track donated by the São Paulo Metropolitan Company - METRO. The analysis of the welded joint followed the recommendations of the technical standard "Arema - American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association". Among the required tests in this standard, metallographic and hardness tests were carried in order to certify the quality of the welded joint. The results showed a change in the joint microstructure and the hardness graph showed a variation caused by the heat generated by the chemical reaction during welding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1– Principais ferrovias do Brasil (ANTT)	14
Figura 2.1 – Evolução do Perfil dos Trilhos – Perfis de Aço “Chato”, para “apoio contínuo”.....	16
Figura 2.2 – Perfil do trilho Vignole (Valente S.p.a).....	16
Figura 2.3 – Conjunto de soldagem Aluminotérmica (Thermit do Brasil).....	21
Figura 2.4 – Cadiño Longa Vida	22
Figura 2.5 – Molde Cerâmico (Valente S.p.a.).....	23
Figura 2.6 – Sistema de pré-aquecimento (Valente S.p.a.)	23
Figura 2.7 – Black hole (WTIA,2006)	26
Figura 2.8 – Contração da solda (WTIA,2006)	27
Figura 2.9 – Falta de fusão (WTIA,2006)	28
Figura 2.10 – Porosidade (WTIA,2006)	29
Figura 4.1 – Esquema de um corte longitudinal na solda onde será realizada a análise metalográfica.....	32
Figura 4.2 – Regiões onde foram realizadas as micrografias.....	33
Figura 4.3 – Regiões onde foram realizadas as dureza.....	34
Figura 5.1 – Macrografia	35
Figura 5.2 – Regiões realizadas as micrografias.....	38
Figura 5.3 – Micrografia Metal de Base do Boleto – aumento 20X.....	39
Figura 5.4 – Micrografia Metal de Base do Boleto – aumento 100X.....	39
Figura 5.5 – Micrografia Início da ZAC do Boleto – Aumento 20X.....	40
Figura 5.6 – Micrografia Início da ZAC do Boleto – Aumento 100X.....	41
Figura 5.7 – Micrografia Centro da ZAC do Boleto – Aumento 20X.....	41
Figura 5.8 – Micrografia Centro da ZAC do Boleto – Aumento 100X.....	42
Figura 5.9 – Micrografia Final da ZAC com ZF do Boleto – Aumento 20X.....	43
Figura 5.10 – Micrografia Final da ZAC com ZF do Boleto – Aumento 100X	43
Figura 5.11 – Micrografia da ZF do Boleto – Aumento 20X	44
Figura 5.12 – Micrografia da ZF do Boleto – Aumento 100X	44
Figura 5.13 – Micrografia Metal de Base da Alma – aumento 20X	45
Figura 5.14 – Micrografia Metal de Base da Alma – aumento 100X	46
Figura 5.15 – Micrografia Início da ZAC da Alma – Aumento 20X.....	46
Figura 5.16 – Micrografia Início da ZAC da Alma – Aumento 100X	47
Figura 5.17 – Micrografia Centro da ZAC da Alma – Aumento 20X	47
Figura 5.18 – Micrografia Centro da ZAC da Alma – Aumento 100X	48
Figura 5.19 – Micrografia Final da ZAC com ZF da Alma – Aumento 20X	49
Figura 5.20 – Micrografia Final da ZAC com ZF da Alma – Aumento 100X	49
Figura 5.21– Micrografia da ZF da Alma – Aumento 20X	50
Figura 5.22 – Micrografia da ZF da Alma – Aumento 100X	51
Figura 5.23– Micrografia Metal de Base do Patim – aumento 20X	51
Figura 5.24 – Micrografia Metal de Base do Patim – aumento 100X	52
Figura 5.25– Micrografia Início da ZAC do Patim – Aumento 20X.....	52
Figura 5.26 – Micrografia Início da ZAC do Patim – Aumento 100X.....	53
Figura 5.27– Micrografia Centro da ZAC do Patim – Aumento 20X	54
Figura 5.28 – Micrografia Centro da ZAC do Patim – Aumento 100X	54

Figura 5.29– Micrografia Final da ZAC com ZF do Patim– Aumento 20X	55
Figura 5.30 – – Micrografia Final da ZAC com ZF do Patim– Aumento 100X ...	55
Figura 5.31 – Micrografia da ZF do Patim – Aumento 20X	56
Figura 5.32 – Micrografia da ZF do Patim – Aumento 100X	56
Figura 5.33 – Gráfico de Comparação de Dureza Brinell das três partes do Trilho	57
Figura 5.34 – Macrografia do Teste de Dureza Brinell do Boleto	57
Figura 5.35 – Gráfico de Dureza Brinell do Boleto – Comparativo de ZAC Visual e ZAC Dureza.....	58
Figura 5.36 – Macrografia do Teste de Dureza Brinell da Alma	59
Figura 5.37 – Gráfico de Dureza Brinell da Alma– Comparativo de ZAC Visual e ZAC Dureza.....	59
Figura 5.38 - Macrografia do Teste de Dureza Brinell do Patim.....	60
Figura 5.39 – Gráfico de Dureza Brinell do Patim– Comparativo de ZAC Visual e ZAC Dureza.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Tipos de defeitos de soldagem.....	25
Tabela 4.1 – Composição química do trilho (AREMA)	31

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

API:	American Petroleum Institute
ASTM:	American Society for Testing and Materials
AWS:	American Welding Society
B:	Elemento químico Boro
Cr:	Elemento químico Cromo
DHH:	Deep Head Hardened
ED´s:	Ensaios Destrutivos
END´s:	Ensaios Não Destrutivos
EVS:	Ensaio Visual de Solda
FHT:	Full Heat Treated
HH:	Head Hardened
M:	Unidade de medida metro
MA:	Metal de adição
MS:	Metal de Solda
Mg:	Elemento químico Magnésio
Mn:	Elemento químico Manganês
Mo:	Elemento químico Molibdênio
Nb:	Elemento químico Nióbio
Ni:	Elemento químico Níquel
Si:	Elemento químico Silício
V:	Elemento químico Vanádio
ZAC:	Zona Afetada pelo Calor

ZF: Zona Fundida

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	ii
AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS	xi
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. SOLDAGEM EM TRILHOS FERROVIÁRIOS	15
2.2. Trilhos.....	15
2.2.1. Trilhos Perlíticos.....	18
2.2.2. Trilhos Bainíticos e Martensíticos.....	19
2.3. MÉTODOS DE SOLDAGEM DE TRILHOS.....	19
2.3.1. Soldagem Elétrica de Topo por Centelhamento (caldeamento)....	19
2.3.2. Soldagem Aluminotérmica	20
2.4. EQUIPAMENTOS DE SOLDAGEM ALUMINOTÉRMICA.....	22
2.5. PROPRIEDADES DA SOLDA ALUMINOTÉRMICA.....	24
2.6. DEFEITOS DA SOLDAGEM ALUMINOTÉRMICA	24
2.6.1. Black Holes.....	26
2.6.2. Inclusões de Escória.....	26
2.6.3. Contração da Solda	27
2.6.4. Inclusão de Areia	27
2.6.5. FALTA DE FUSÃO.....	28
2.6.6. POROSIDADE	28
3. OBJETIVO	30
4. MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1. Materiais	31
4.2. Caracterização metalográfica	32
4.3. Caracterização microestrutural	32
4.4. Caracterização Mecânica.....	33
4.4.1. Dureza Brinell	33
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
5.1. Caracterização metalográfica.....	35
5.1.1. Macrografia	35
5.1.2. Micrografia	38
5.1.3. Perfil de dureza do trilho	57
6. CONCLUSÕES.....	62
SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	63
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Escolhi fazer este trabalho por perceber que, além de haver uma grande procura pela mão de obra na área de linhas metro–ferroviárias, o Brasil, por se tratar de um país de tamanho continental, precisa explorar melhor a capacidade deste transporte.

A estruturação e manutenção das nossas linhas metro–ferroviárias são realizadas por profissionais que estiveram presentes na construção das ferrovias na década de 1960. De lá para cá, este setor sofreu altos e baixos, e teve a expansão de sua capacidade atrasada. É necessária a expansão, tanto para o transporte de massa nas principais cidades do país, que contam com transito caótico, como para o transporte de produtos entre estados, não só das commodities, mas também de produtos de valor agregado, pois notamos que nossa malha rodoviária está cada vez mais precária e não atende o nível de escoamento dos nossos produtos internos e de exportação.

O sistema metro–ferroviário brasileiro totaliza 29.706 quilômetros, se concentra nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste, e atende parte do Centro–Oeste e Norte do país. Nos últimos anos foram concedidos 28.840 quilômetros das malhas. (ANTT)

Por entender que precisamos de transportes rápidos, sem perda aos setores e que atenda a capacidade territorial de um país como o Brasil, decidi realizar um trabalho voltado a este tipo de assunto.

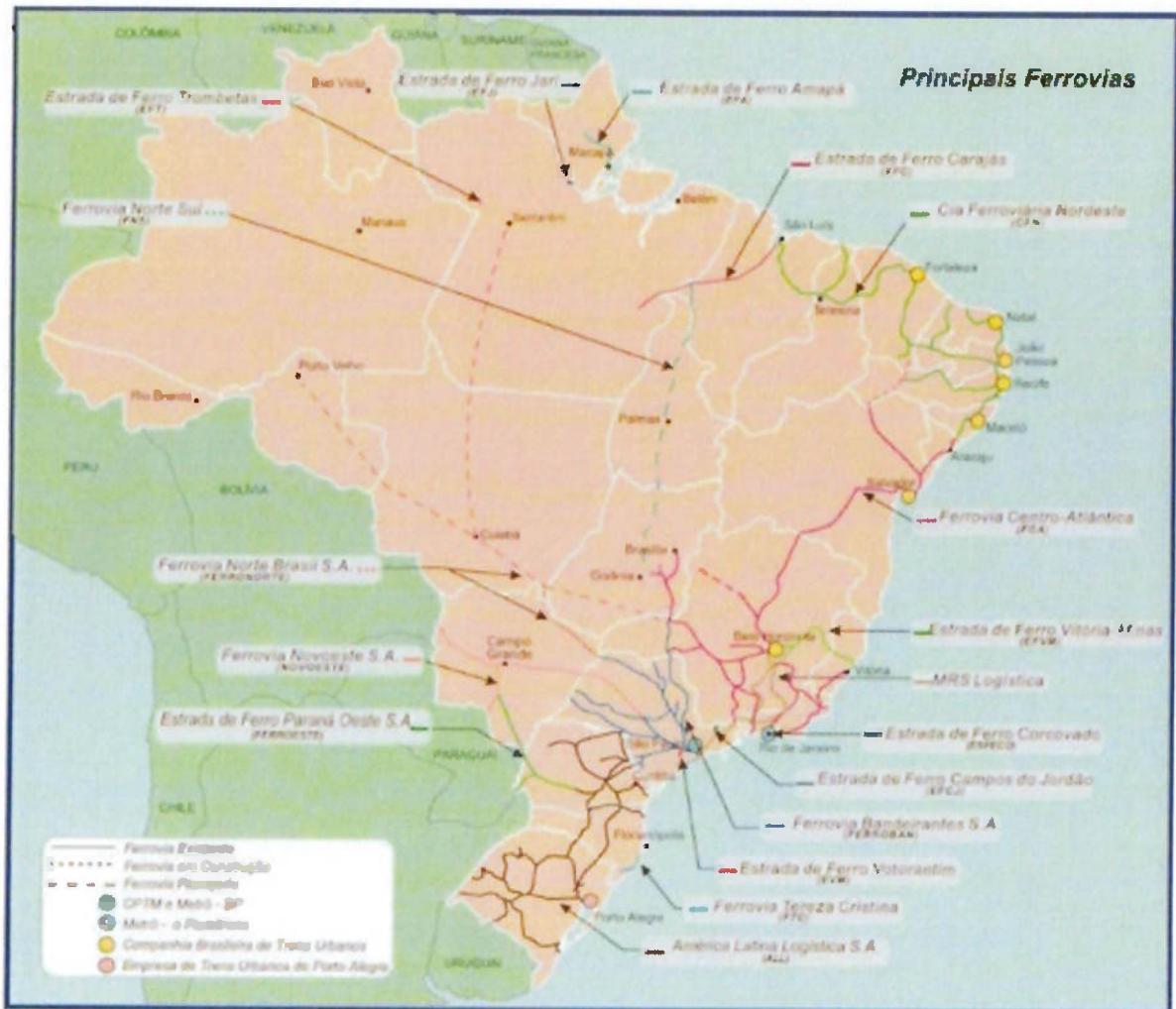


Figura 1.1– Principais ferrovias do Brasil (ANTT)

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. SOLDAGEM EM TRILHOS FERROVIÁRIOS

As uniões entre trilhos são os pontos fracos das vias ferroviárias, locais em que se localizam os defeitos mais graves, e onde está relacionado o maior número de acidentes.

Portanto, com a modernização do sistema, o uso de trilhos longos, ou seja, vias onde os trilhos são unidos através de soldas oferecem inúmeras vantagens de ordem técnica e econômica.

A soldagem dos trilhos, além de eliminar as antigas juntas, também permite à composição ter um movimento mais suave, proporcionando maior conforto e velocidade.

2.2. TRILHOS

Os trilhos são elementos utilizados na fabricação de vias permanentes ferroviárias, fabricados em aço especial, de tamanho comercial entre 12 e 36 m, e são classificados pelo peso que sustentam por metro linear, como exemplo TR 37, 45, 50, 57 e 68, e servem para guiar as rodas dos trens, carros e vagões.

Os trilhos são assentados sobre dormentes e transferem para estes toda solicitação de esforço da via, além sustentar e conduzir os trens, formando uma estrutura extensa e contínua.

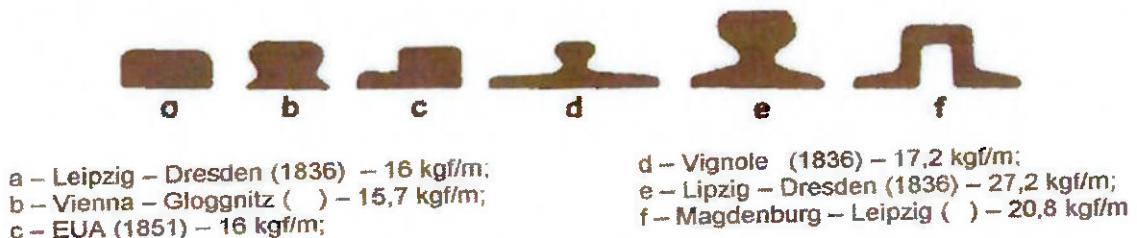


Figura 2.1 – Evolução do Perfil dos Trilhos – Perfis de Aço “Chato”, para “apoio contínuo”.

O perfil mais utilizado nas vias atualmente é o do tipo Vignole, cuja geometria, por possuir maior concentração de massa nas regiões onde as solicitações são maiores, proporciona maior resistência à flexão.

O perfil do trilho *Vignole* mostrado na Figura 2.2 é formado por três regiões distintas:

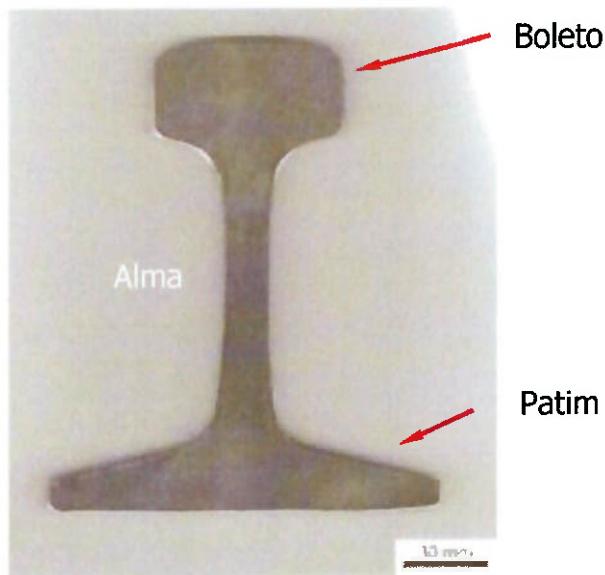


Figura 2.2 – Perfil do trilho Vignole (Valente S.p.a)

- O BOLETO (B) é a parte superior do trilho, que está sujeita ao atrito e ao desgaste graças ao contato direto com a roda. Portanto tem uma concentração maior de massa.
- A ALMA (A) é a ligação do boleto e do patim, e é responsável pela altura do trilho.

– O PATIM (P) é a região inferior do trilho, portanto a parte responsável pela fixação e estabilidade do elemento e também pela transferência dos esforços aos dormentes.

A altura (H) e espessura desse elemento influenciam o momento de inércia, resistência e rigidez transversal da seção.

Os trilhos, devido às suas condições de serviço, devem possuir propriedades mecânicas e metalúrgicas que reúnam as seguintes características:

- Elevados limites de resistência mecânica aliada à boa tenacidade;
- Alta dureza e resistência ao desgaste;
- Resistência à fadiga de contato e a propagação de trincas pré-existentes;
- Boa tenacidade à fratura;
- Baixa suscetibilidade à fragilização por hidrogênio e adequada soldabilidade.

Atualmente, com o avanço da indústria metalúrgica, podemos contar com diversos tipos de trilhos. Eles podem ser classificados, além da sua capacidade de carga linear, também pela sua natureza metalúrgica e propriedades mecânicas de acordo com o tratamento térmico.

O tratamento térmico determina a profundidade do endurecimento do boleto, e é classificado como:

- Head Hardned – HH: com profundidade de endurecimento de aproximadamente 30 mm
- Deep Head Hardened – DHH: endurecimento aproximado de até 45 mm de profundidade
- Full Heat Treated – FHT: toda a seção transversal é tratada termicamente

Nota-se que a dureza superficial do trilho pode variar de maneira significativa ao longo da vida útil por causa do encruamento gerado pelo contato da roda com trilho.

Quanto à natureza metalúrgica, os trilhos podem ser perlíticos, bainíticos ou martensíticos.

2.2.1. TRILHOS PERLÍTICOS

Os trilhos perlíticos, constituídos por aços com teor de carbono (0,6 e 0,9%) e adições de Mn e Cr, apresentam microestrutura totalmente perlítica sem ferrita livre, alcançando resistência de 900–1200 MPa e dureza entre 260 e 290 HB.

Este componente, constituído basicamente de perlita fina, confere ao trilho maior resistência mecânica ao desgaste, por possuir pequenos espaçamentos interlamelares. Lembramos, ainda, que a microestrutura é submetida a um alto grau de encruamento devido ao contato roda/trilho.

Há ainda os trilhos perlíticos microligados, que contam com adição de Nb, V e Mo. Esses elementos aumentam a resistência para aproximadamente 1300 MPa e dureza de até 400 HB.

A perlita é um elemento que eleva a resistência mecânica do trilho, dando melhor resistência ao desgaste, mas diminui drasticamente a tenacidade e ductilidade do material. O tratamento térmico para refinamento da perlita é bastante utilizado para o aumento da ductilidade desse elemento.

Estes trilhos são bastante utilizados em seções retas da via, onde o desgaste é menor.

2.2.2. TRILHOS BAINÍTICOS E MARTENSÍTICOS

Os trilhos bainíticos possuem baixíssimo teor de carbono (0,02–0,4%), com adições significativas de Mg e Si, além de Cr, Mo, Ni e B. Esses aços apresentam resistência mecânica entre 820–1400 MPa, com boa tenacidade à fratura e resistência à propagação de defeitos. São trilhos utilizados, preferencialmente, em vias de alta velocidade ou em curvas de ferrovias de transporte de cargas pesadas.

Os trilhos martensíticos possuem boa resistência ao impacto, satisfatória resistência à fadiga e uma capacidade maior de encruamento, entretanto possuem maior ductilidade do que os trilhos perlíticos.

2.3. MÉTODOS DE SOLDAGEM DE TRILHOS

Os trilhos podem ser soldados através de dois métodos: caldeamento e aluminotermia.

2.3.1. SOLDAGEM ELÉTRICA DE TOPO POR CENTELHAMENTO (CALDEAMENTO)

A soldagem de trilhos por esse método é totalmente automática e pouco depende da atuação do soldador no processo.

Esse método consiste em elevar a temperatura das extremidades dos trilhos, através de uma corrente elétrica de baixa tensão e alta intensidade (12.000 a 60.000 A), produzida por um transformador especial.

Quando as extremidades atingem um grau elevado de temperatura, aproximadamente 1100°C, as pontas são comprimidas uma contra a outra por compressão, variando entre 400 e 700 kgf/cm². Após a união, é realizado

tratamento térmico da solda e um acabamento por esmerilhamento, a fim de garantir a continuidade geométrica do trilho.

2.3.2. SOLDAGEM ALUMINOTÉRMICA

A soldagem aluminotérmica, por possuir relativa simplicidade, é aplicada onde outros processos mais complexos não podem ser usados.

Por não depender de fontes externas de energia, a aluminotermia consagrou-se como um dos métodos mais empregados na soldagem de trilhos metro-ferroviários, principalmente “in-loco”, nos processos de manutenção de vias.

A soldagem se baseia na reação aluminotérmica descoberta, em 1895, pelo químico Dr. Hans Goldschmidt. Uma mistura de granulados de alumínio e óxido de ferro, chamado pelo inventor de THERMIT, reage, com grande produção de calor, gerando ferro líquido a aproximadamente 2500°C (Thermit do Brasil).

Tal reação aluminotérmica apresenta a seguinte fórmula geral:



A reação é bastante intensa e dura aproximadamente 20 segundos, alcançando, em alguns casos, temperaturas superiores a 2500°C, havendo bastante perda de calor no cadiño e também por irradiação.

Ainda, para se produzir uma composição química desejada no cordão de solda, são adicionados, na mistura aluminotérmica, elementos de ferro-liga.

Essa quantidade de elementos ligas contidos na mistura é o que determina a temperatura final da reação.

É importante observar que deverá haver um controle na temperatura da reação, pois para realizar uma boa solda, a mesma não deverá ultrapassar 2500°C (para evitar sublimação do alumínio), e também não poderá ser inferior a 2040°C (para proporcionar uma separação ideal entre a escória e a mistura fundida).

Devemos ainda lembrar que a reação aluminotérmica não é espontânea, necessitando uma ignição inicial. Após a ignição, a mistura inicial que é composta de aproximadamente 25% de alumínio e outros 75% de óxido ferroso e elementos de liga, se reduz a metade do peso e um terço do volume original, gerando 70% de aço-liga e 30% de escória.

A junção entre os elementos se dá através do metal fundido, que age como o metal de adição (MA) da junta.

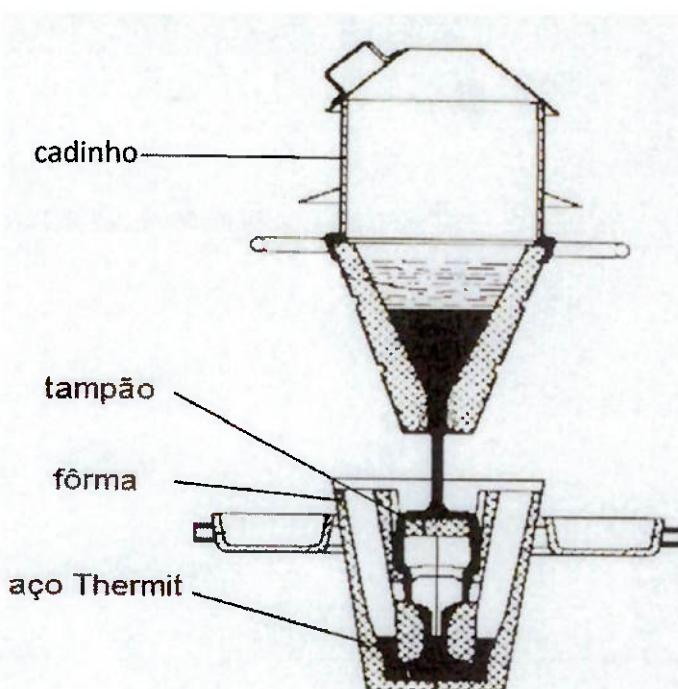


Figura 2.3 – Conjunto de soldagem Aluminotérmica (Thermit do Brasil)

A Figura 2.3 apresenta uma configuração do conjunto molde cadiño utilizado na soldagem de trilhos. A mistura é colocada no cadiño que fica posicionado sobre o molde, vedado com um tampão. Após a ignição da mistura ocorre a fusão da carga e a separação entre o aço líquido e a escória de óxidos. O aço líquido dissolve o tampão e é vazado no espaço entre os trilhos e o molde, realizando a união metálica. Por diferença de densidade, a escória permanece acima da fase líquida, sendo descartada em um recipiente externo. Vale lembrar, ainda, que há três métodos mais usados para a soldagem por aluminotermia: SKV, SMF e SOWOS, sendo diferenciados pelo tempo de preaquecimento e fôrma de vazamento.

2.4. EQUIPAMENTOS DE SOLDAGEM ALUMINOTÉRMICA

Basicamente são utilizados três equipamentos: Cadiño, Fôrma (molde) e Sistema de Pré-Aquecimento.

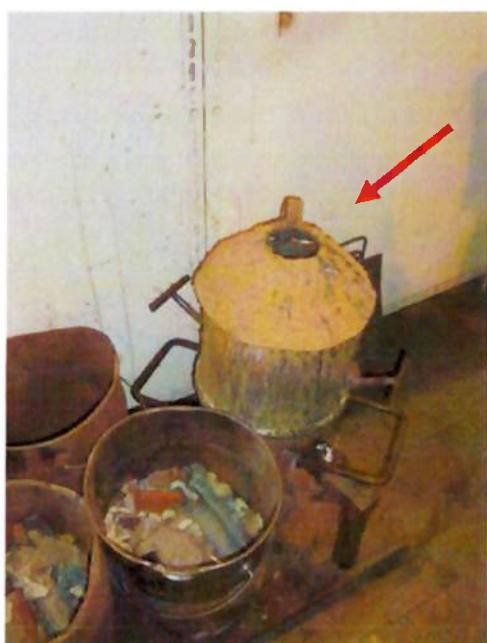


Figura 2.4 – Cadiño Longa Vida

No processo aluminotérmico, o cadinho usado pode ser cadinho de longa vida, Figura 2.4, ou cadinho descartável. O Cadinho é onde será colocado o material de solda e local em que a reação química da soldagem ocorrerá.



Figura 2.5 – Molde Cerâmico (Valente S.p.a.)

O molde é a estrutura montada e fixada no trilho, Figura 2.5. O molde tem a função de guiar o metal fundido no espaçamento entre os trilhos. Para o procedimento ser realizado com sucesso é necessário realizar uma vedação do trilho com o molde e, ainda, pré aquecê-lo conforme solicitado pelo fabricante.



Figura 2.6 – Sistema de pré-aquecimento (Valente S.p.a.)

O sistema de pré-aquecimento é composto de maçarico e um elemento metálico de fixação, Figura 2.6, que serve para posicionar a chama do maçarico no local e distância correta.

2.5. PROPRIEDADES DA SOLDA ALUMINOTÉRMICA

Por se tratar de um processo onde a sua estrutura se origina através de metal fundido, a solda possui propriedades mecânicas inferiores às do material do trilho, mas são os parâmetros de soldagem em conjunto com a mistura aluminotérmica utilizada que determinam as suas propriedades.

O exame da solda deve abordar a distribuição de dureza ao longo da junção, tanto no metal de adição (MA) como em toda a zona afetada pelo calor (ZAC), além das características metalúrgicas da solda, onde deverá observar uma microestrutura perlítica (na qual são permitidas mínimas formações de ferrita - fases martensíticas e bainíticas devem ser desconsideradas por possuírem menor tenacidade que o cordão de solda).

2.6. DEFEITOS DA SOLDAGEM ALUMINOTÉRMICA

Os defeitos da soldagem aluminotérmica são identificados em função de sua natureza, formas e dimensões. A classificação abrange dois grupos: defeitos planares e defeitos não planares, cujos tipos estão apresentados na tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Tipos de defeitos de soldagem

Defeitos Planares	<ul style="list-style-type: none"> – Trincas – Defeitos de forma (sulcos, mordeduras, concavidades na raiz)
Defeitos Não Planares	<ul style="list-style-type: none"> – Porosidade – Inclusões

O processo de aluminotermia geralmente produz soldas de boa qualidade, no entanto, há a possibilidade da ocorrência de inúmeros defeitos, pois a natureza do processo metalúrgico da solda aluminotérmica contribui para o surgimento de defeitos na junta soldada, como:

- Inclusão de Areia;
- Contração da Solda;
- Porosidade;
- Inclusões de Escória;
- Gota Fria ou falta de fusão

Alguns defeitos podem ser ocasionados por procedimentos de soldagem ou material inadequado, ou são ocasionados por parâmetros de soldagem incorretos como: rechupes, solda-fria e segregação, e ainda podem ocorrer variações ocasionais no perfil da solda, geradas por condições severas de serviço, que são interpretadas como defeitos.

A seguir são apresentados alguns dos principais tipos de defeitos observados em soldas aluminotérmicas, de acordo com documento do Welding Technology Institute of Austrália (WTIA, 2006).

2.6.1. BLACK HOLES

São defeitos gerados através da formação de gases oriundos da má vedação do molde, onde o MS entra em contato com o ar, originando poros isolados chamados 'black holes'. Outra forma de aparecer este defeito é justamente por espaçamentos estreitos, onde o MS será depositado.



Figura 2.7 – Black hole (WTIA,2006)

2.6.2. INCLUSÕES DE ESCÓRIA

Inclusões de escória no processo de solda aluminotérmica são causadas por limpeza inadequada do cadinho utilizado, quando esse é multiuso, falha no pré-aquecimento da solda, mau acabamento no perfil a ser soldado, espaçamento incorreto dos perfis que afetam o fluxo do MS no molde. Este defeito é bastante grave, pois poderá nuclear trincas de fadiga na região do cordão.

2.6.3. CONTRAÇÃO DA SOLDA

A contração da solda aluminotérmica ocorre na zona do trilho que tem o último momento de resfriamento, isso é, dependendo do tipo de método que é utilizado no vazamento, poderá ser a região do boleto ou patim.

As causas desse defeito podem ser verificadas quando o pré-aquecimento é realizado de forma inadequada, remoção do molde antes da solidificação total da junta e movimentos indevidos no trilho soldado.



Figura 2.8 – Contração da solda (WTIA,2006)

2.6.4. INCLUSÃO DE AREIA

A inclusão de areia é causada pela queima da vedação do molde durante o pré-aquecimento, ou ainda quando o metal de solda entra diretamente com a vedação do molde, o que acarreta na vitrificação da areia e inclusão na superfície da solda.

Este defeito pode ser corrigido através de um esmerilhamento superficial. Mas, caso não resolva por estar muito profundo, a solda deverá ser reparada.

2.6.5. FALTA DE FUSÃO

A falta de fusão na solda aluminotérmica é causada por diversos fatores, como por exemplo, o desalinhamento de moldes de fusão, atraso no derramamento do MS no molde, pré-aquecimento realizado de forma inadequada, problema na mistura de gases no maçarico de pré-aquecimento causando baixa caloria no aquecimento dos trilhos, espaçamento incorreto dos perfis que afetam o fluxo do MS no molde, mistura aluminotérmica irregular.



Figura 2.9 – Falta de fusão (WTIA,2006)

2.6.6. POROSIDADE

A principal causa da porosidade na solda aluminotérmica é a presença de umidade na mistura aluminotérmica, o que pode acarretar alteração na reação química. Mas, como fatores que ainda contribuem para o aparecimento de porosidade no cordão de solda, podem destacar a falta ou inadequado pré-

aquecimento, contaminação do molde utilizado, má vedação do molde e a realização do procedimento sob chuva.

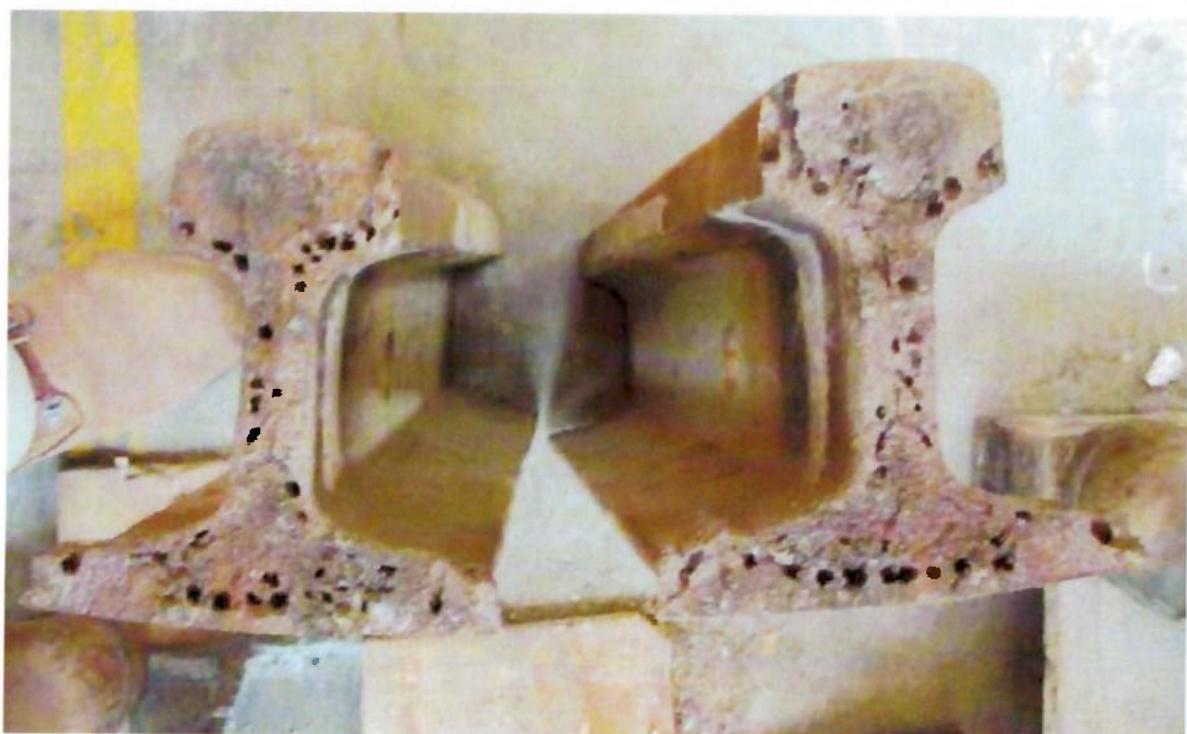


Figura 2.10 – Porosidade (WTIA,2006)

3. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é realizar a caracterização metalográfica de uma junta soldada por aluminotermia de um trilho de perfil AREMA 115 RE (115 lb/yd), ou equivalente a ABNT-TR-57 (57 kg/m), utilizado pela Companhia do Metropolitano de São Paulo – METRO.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Conforme especificado pelo fabricante da solda aluminotérmica, o espaçamento entre os trilhos a serem soldados deverá ter entre 24 – 26 mm, conforme demonstrado na Figura 4.2.

Já o critério de aceitação da solda realizada deve obedecer à norma técnica BS EN 14.730-1.

4.1. MATERIAIS

A composição química do trilho estudado respeita a tabela 4.1 Composição e Propriedades do Trilho.

Tabela 4.1 – Composição química do trilho (AREMA)

Elemento Químico	Análise química (%)		Análise de Produto (%) Subsídio para limites fora da análise química especificada	
	Mínimo	Máximo	Abaixo do Mínimo	Acima do máximo
Carbono	0,74	0,84	0,04	0,04
Manganês	0,8 ¹	1,1 ¹	0,06	0,06
Fósforo	–	0,035	–	0,008
Enxofre	–	0,037	–	0,008
Silício	0,1	0,6	0,02	0,05
Níquel		– ¹		
Cromo		– ¹		
Molibdênio		– ¹		

Nota 1: Os limites de manganês e dos elementos residuais podem ser variados pelo fabricante para satisfazer os requisitos de propriedades mecânicas do seguinte modo:

Manganês		Níquel	Cromo	Molibdênio	Vanádio
Mínimo	Máximo	Máximo	Máximo	Máximo	Máximo
0,6	0,79	0,25	0,5	0,1	0,03
1,11	1,25	0,25	0,25	0,1	0,05

4.2. CARACTERIZAÇÃO METALÓGRAFICA

Foi realizado um corte longitudinal na seção do trilho soldado, preservando o meio da seção. Ainda há uma amostra do perfil do trilho.

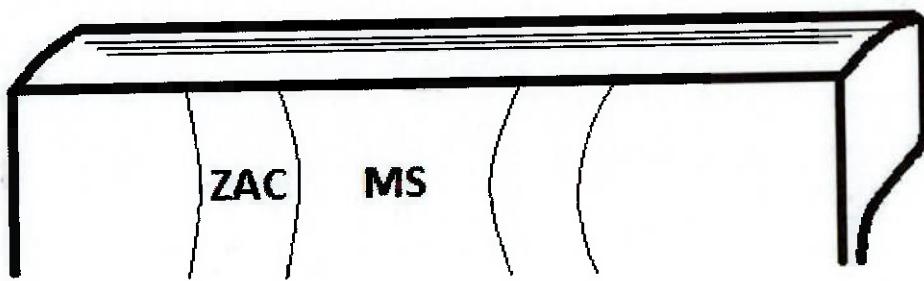


Figura 4.1 – Esquema de um corte longitudinal na solda onde será realizada a análise metalográfica.

4.3. CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

A análise microestrutural da união soldada do trilho foi realizada em três áreas diferentes tomadas do corpo de prova geral, as quais têm dimensões de 90 x 25 mm, como mostrado na Figura 4.2. Seguidamente, os corpos de prova foram preparados de acordo com procedimentos padrões de metalografia, realizando o lixamento das amostras com lixas de diferentes granulometrias; a sequência de granulometria das lixas foi: 180, 220, 320, 400, 600 e 1000 "meshes" e polidas com pasta de diamante na sequência: 6, 3 e 1 μm de tamanho médio de partícula.

Uma vez obtida a superfície totalmente polida, o material foi submetido a ataque químico com Nital 2%, com tempo aproximado de 30s.

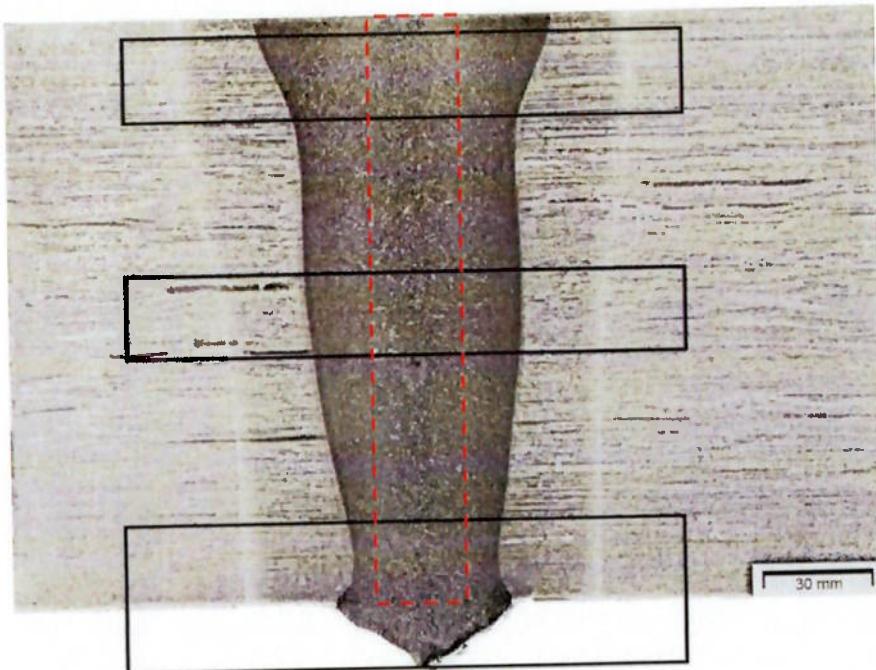


Figura 4.2 – Regiões onde foram realizadas as micrografias.

4.4. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

4.4.1. DUREZA BRINELL

O ensaio de dureza foi realizado na escala Brinell, em um durômetro TESTOR modelo OTTO-WOLPERT-WERKE, com uma esfera de tungstênio de 2,5 mm de diâmetro e carga de 187,5 Kgf, de acordo com a Norma ABNT NBR NM ISO 6506–1. A dureza foi efetuada em três linhas diferentes no corpo de prova soldado, como apresentado na Figura 4.3.

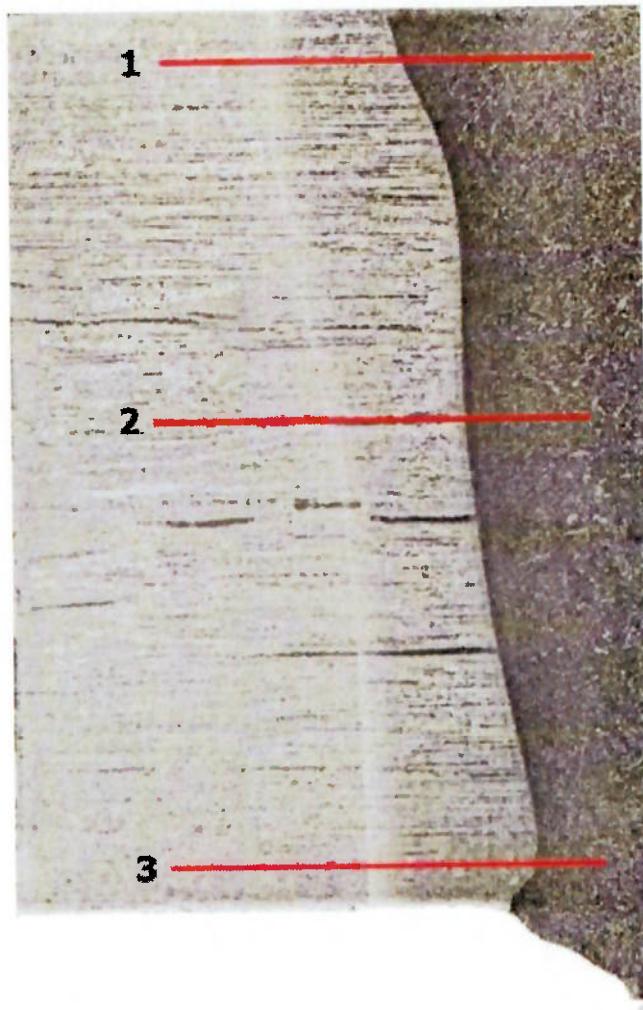


Figura 4.3 – Regiões onde foram realizadas as dureza.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.

5.1. CARACTERIZAÇÃO METALOGRAFICA.

5.1.1. MACROGRAFIA.

Foi verificado, através da macrografia, o formato do cordão de solda e a extensão da ZAC, que variou conforme macrografia abaixo, representada pela Figura 5.1.

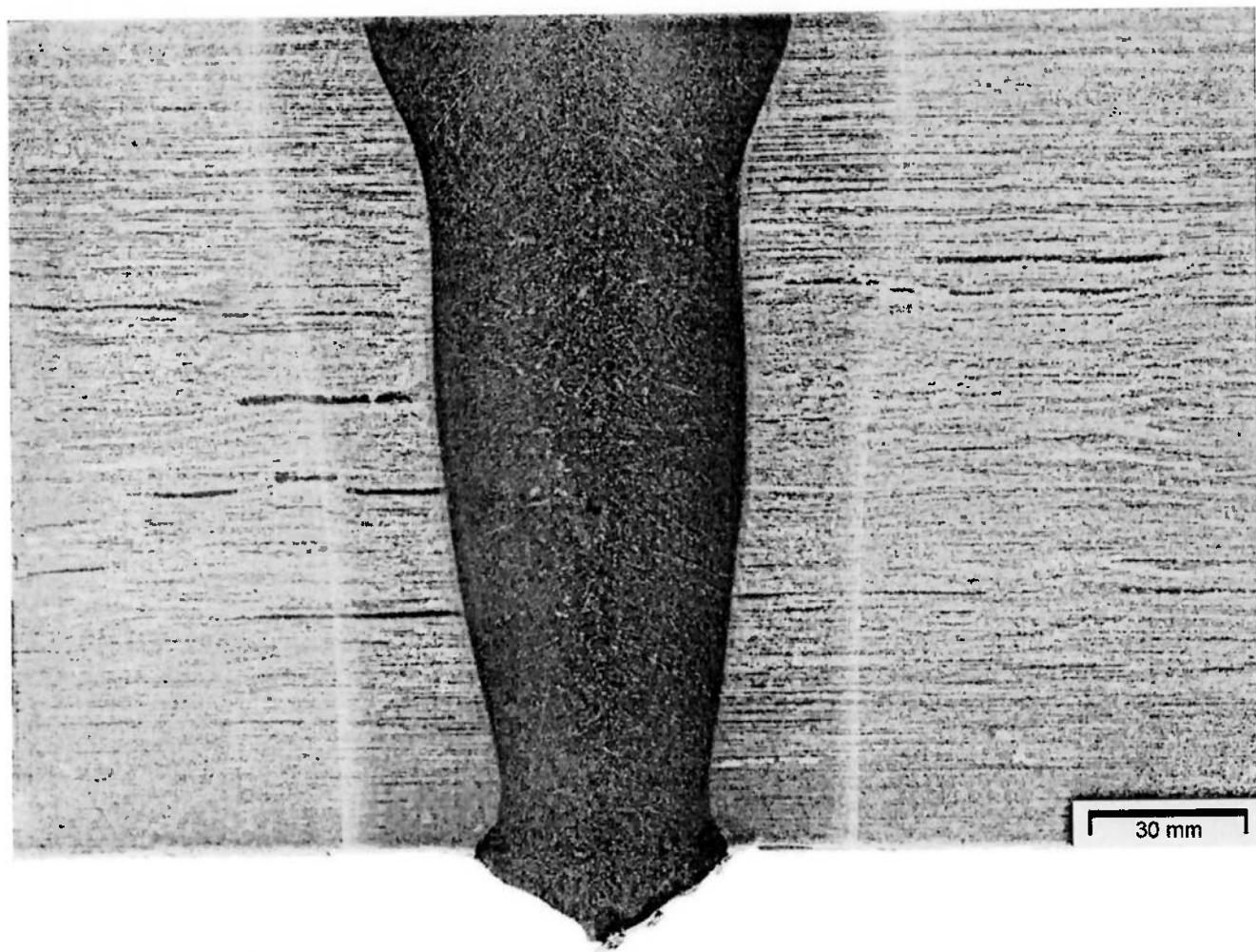


Figura 5.1 – Macrografia

5.1.1.1. TRILHO ORIGINAL

Conforme pode observar, o material do trilho apresenta inúmeras regiões com sulfeto de manganês, representadas pelas regiões longitudinais pretas.

Esses sulfetos são formados através da laminação do perfil do trilho.

5.1.1.2. PERFIL DA SOLDA

A macrografia mostra um perfil maior na parte do boleto, apesar de ser a região do trilho que apresenta a maior massa, é também o local com maior aporte de calor gerado pelo pré-aquecimento, e também é onde o metal fundido primeiramente penetra no molde.

Neste processo, o patim apresenta uma diminuição pelo resfriamento do material fundido, e a alma tende a ser menor, ainda que possua maior massa.

5.1.1.3. BOLETO

No boleto, local que apresenta maior espessura da zona fundida por receber diretamente a fonte de pré-aquecimento, também é o primeiro local em que o metal fundido é recebido.

Nota-se que a área da zona fundida chega a medir aproximadamente 69,6 mm.

5.1.1.3.1. Extensão da ZAC

No boleto, a zona afetada pelo calor (ZAC) tem uma espessura visual de 23,3 mm de cada lado da ZF.

5.1.1.4. ALMA

Na alma, onde é encontrada a menor massa do trilho, pode-se notar visualmente que a ZF chega a medir aproximadamente 62,4 mm.

5.1.1.4.1. Extensão da ZAC

Na alma, apesar de receber o metal fundido com menor calor e possuir uma massa menor que o boleto, a ZAC da região visualmente não se altera muito, com aproximadamente 24,4 mm de cada lado, pois é o local onde o metal de base resfria mais rápido em relação temperatura x tempo.

5.1.1.5. PATIM

Nota-se que o patim é o local do trilho que apresenta a menor ZF, com espessura aproximada de 28,4 mm. Isso é explicado porque ele tem massa maior que a alma e recebe um metal fundido com temperatura relativamente menor.

5.1.1.5.1. Extensão da ZAC

Em compensação, a ZAC do patim é a maior dos três elementos do trilho, com valor visual aproximado 31,1 mm de cada lado da ZF. Isso ocorre porque, por possuir uma maior massa, é o local onde o trilho demora mais para resfriar, alterando assim a estrutura do metal de base.

5.1.2. MICROGRAFIA

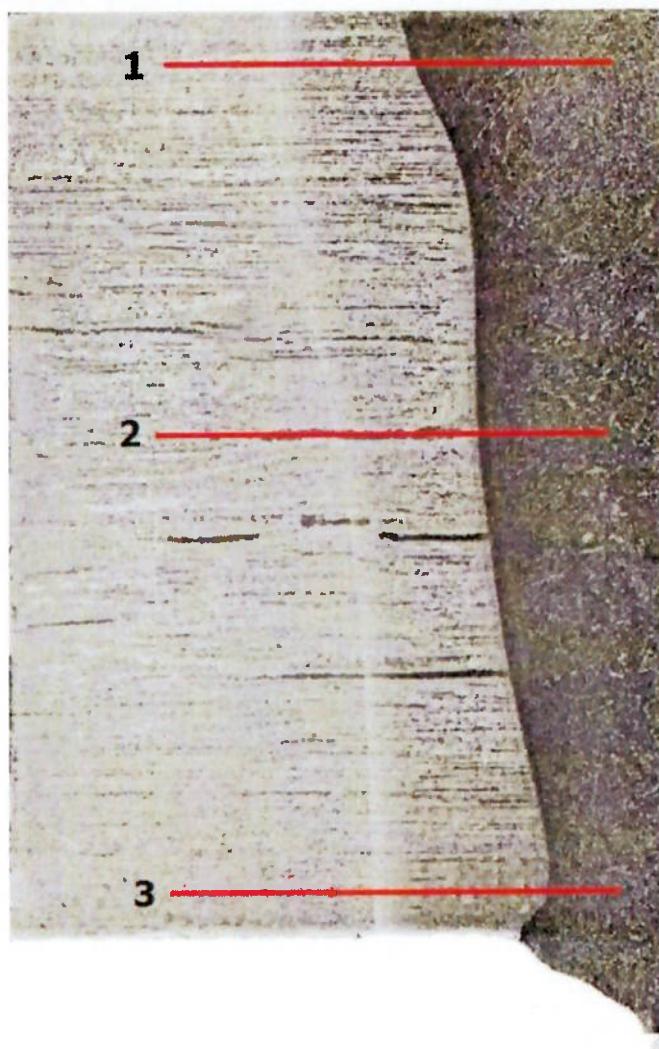


Figura 5.2 – Regiões realizadas as micrografias

Conforme indicado na Figura 5.2, foram realizadas diversas fotografias mostrando as microestruturas da junta soldada.

5.1.2.1. BOLETO

5.1.2.1.1. Metal de base do Boleto

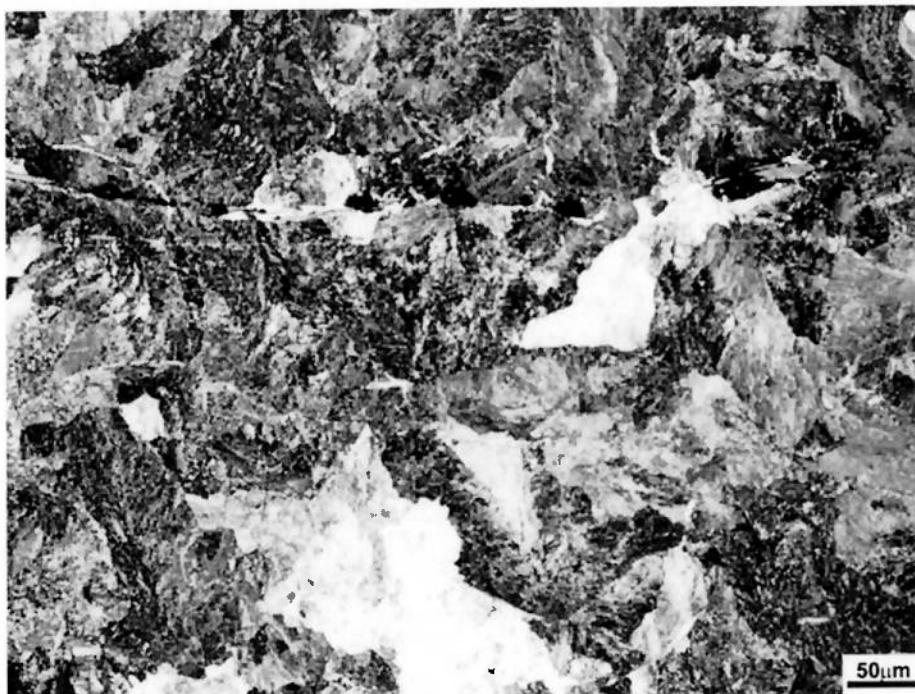


Figura 5.3 – Micrografia Metal de Base do Boleto – aumento 20X

Através da análise micrográfica da Figura 5.3, com aumento de 20X, é possível notar, no MB, microestrutura perlítica (escuro) com presença de ferrita (clara), allotriomórfica e no contorno de grão, formada durante o processo de laminação do trilho.



Figura 5.4 – Micrografia Metal de Base do Boleto – aumento 100X

A figura 5.4 mostra com maior aumento (100X) a mesma microestrutura da figura 5.3, evidenciando a presença da ferrita no contorno de grão.

5.1.2.1.2. Início da Zona Afetada pelo Calor no Boleto

Comparando a Figura 5.5 com a Figura 5.3, pode-se notar um refinamento considerável nos grãos, causado pela temperatura elevada do metal de solda na região do trilho. Nesta região provavelmente a temperatura ficou na região intercrítica, entre as temperaturas A1 e A3. A figura 5.6 mostra no início da ZAC o 'esboroamento' da perlita, isto é, as lamelas de cementita deixam de ser continuas e passam a ser descontinuas. O círculo na figura 5.6 destaca uma região com perlita "esboroadada".

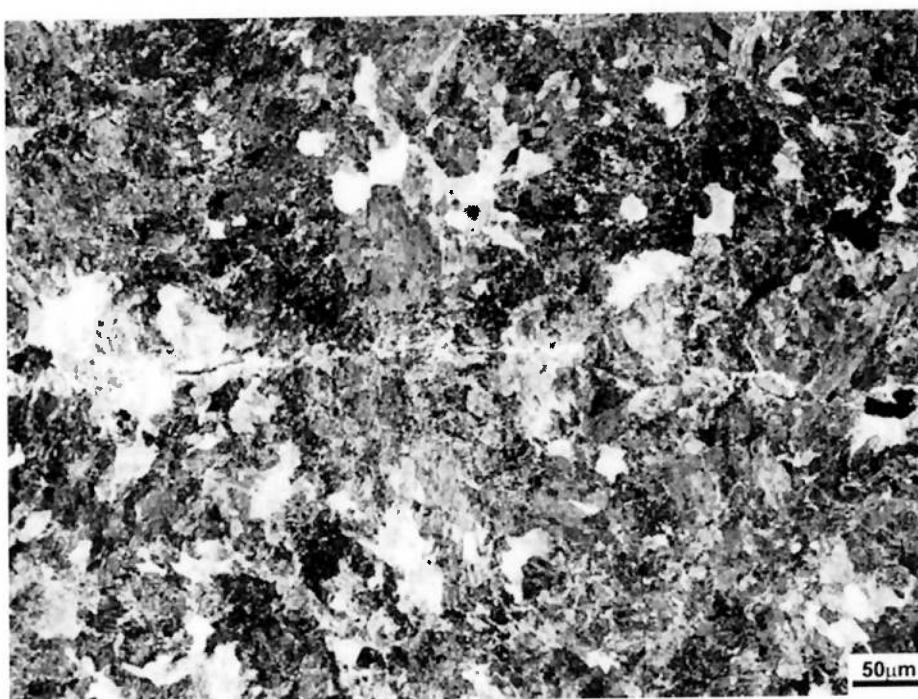


Figura 5.5 – Micrografia Início da ZAC do Boleto – Aumento 20X

Na Figura 5.6 nota-se uma região perlítica com o aumento de ferrita intergranular.



Figura 5.6 – Micrografia Início da ZAC do Boleto – Aumento 100X

5.1.2.1.3. Centro da Zona Afetada pelo Calor no Boleto

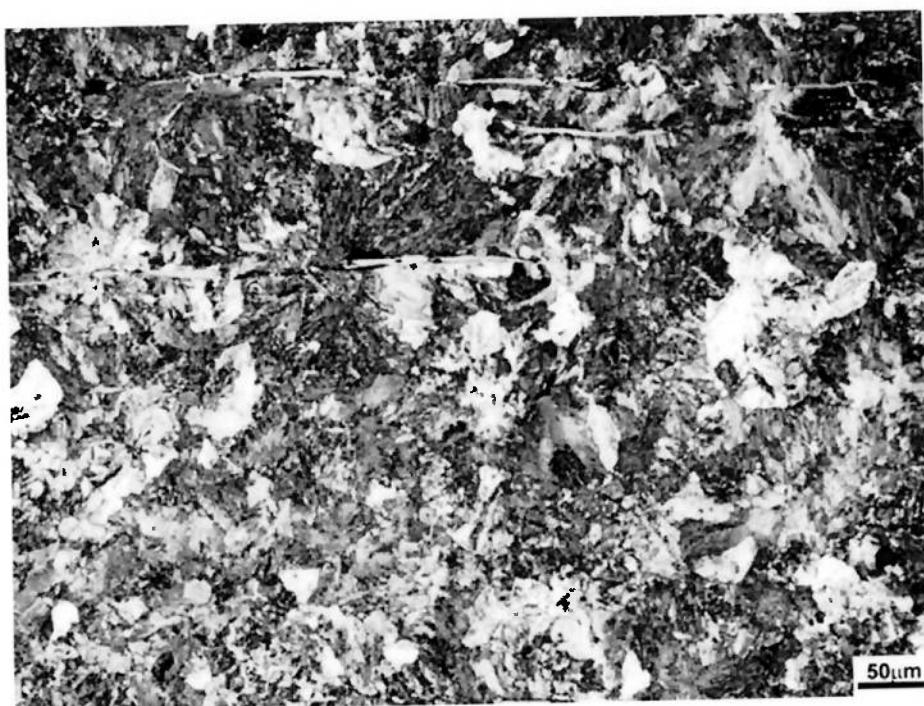


Figura 5.7 – Micrografia Centro da ZAC do Boleto – Aumento 20X



Figura 5.8 – Micrografia Centro da ZAC do Boleto – Aumento 100X

Nas Figuras 5.7 e 5.8 são mostradas as microestruturas no centro do cordão de solda. Nesta região ocorreu o crescimento de grão, provavelmente devido as temperaturas atingidas acima da A3. No resfriamento formou um pouco de ferrita proeutetóide e perlita fina, devido à velocidade de resfriamento ser um pouco maior que na condição anterior, apresentada nas figuras 5.5 e 5.6.

5.1.2.1.4. Região da Zona Afetada com a Zona Fundida do Boleto

Nas Figuras 5.9 e 5.10 é possível verificar a presença de bainita, perlita com a formação de ferrita no contorno do grão.

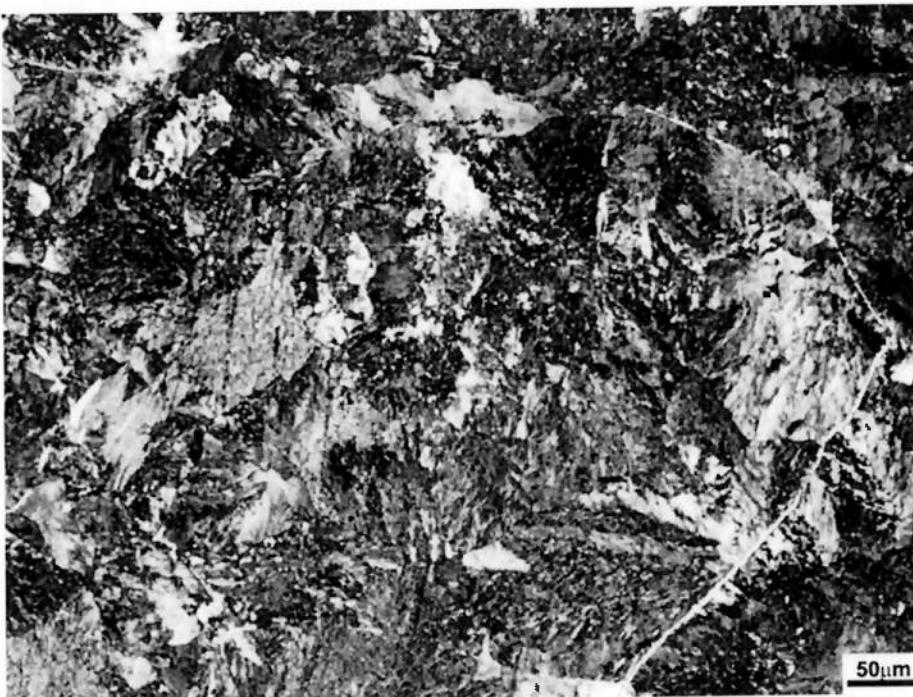


Figura 5.9 – Micrografia Final da ZAC com ZF do Boleto – Aumento 20X

Pode-se notar na Figura 5.10 a presença de ferrita proeutetóide, com predomínio de perlita grossa e fina. Além disto, esta região pode conter fases formadas com velocidades de resfriamento um pouco maiores, como a bainita.



Figura 5.10 – Micrografia Final da ZAC com ZF do Boleto – Aumento 100X

5.1.2.1.5. Região da Zona Fundida do Boleto

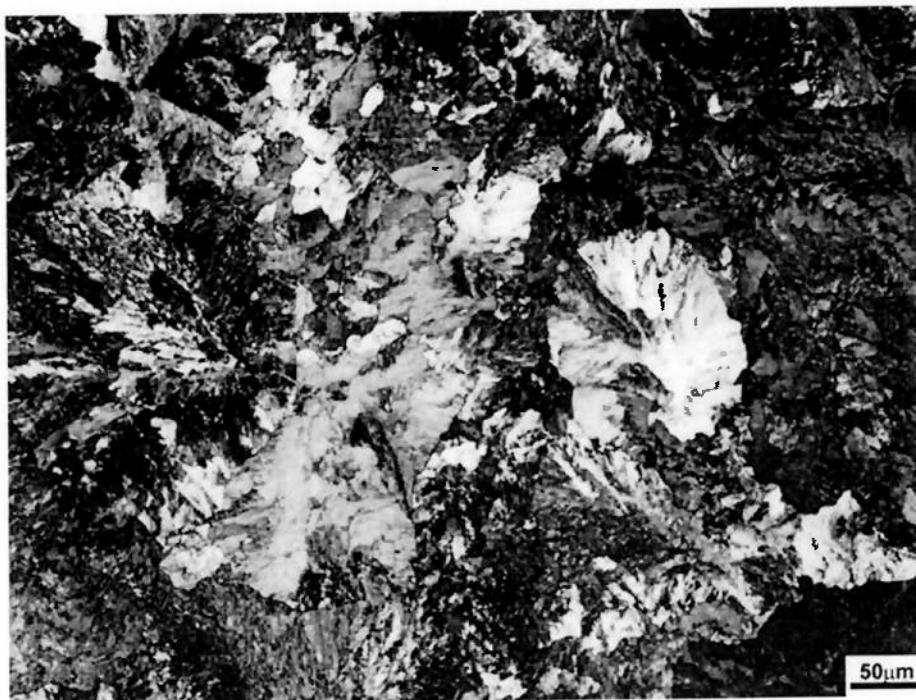


Figura 5.11 – Micrografia da ZF do Boleto – Aumento 20X

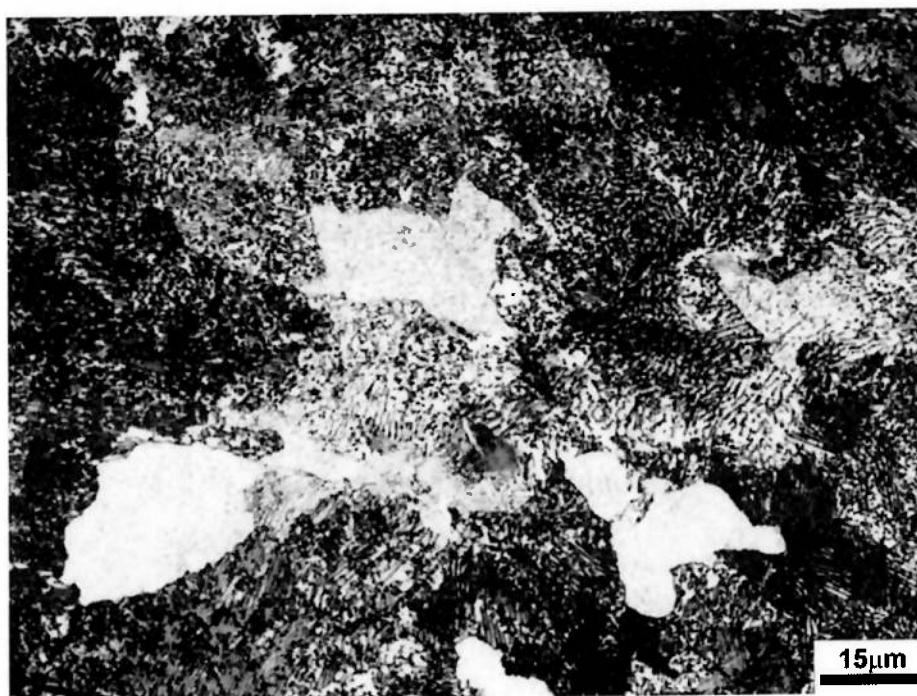


Figura 5.12 – Micrografia da ZF do Boleto – Aumento 100X

Na Figura 5.11 nota-se a presença de perlita e ferrita na zona fundida. É importante salientar que esta região é bruta de fusão. Como tal pode

apresentar regiões com microssegregação de elementos de liga. Pode-se notar também a presença de perlita grossa e fina na Zona de Fundida, que se torna mais visível na a imagem com 100X, conforme mostra a Figura 5.12.

5.1.2.2. ALMA

5.1.2.2.1. Metal de base na Alma

A Figura 5.13 apresenta uma microestrutura perlítica com ferrita.

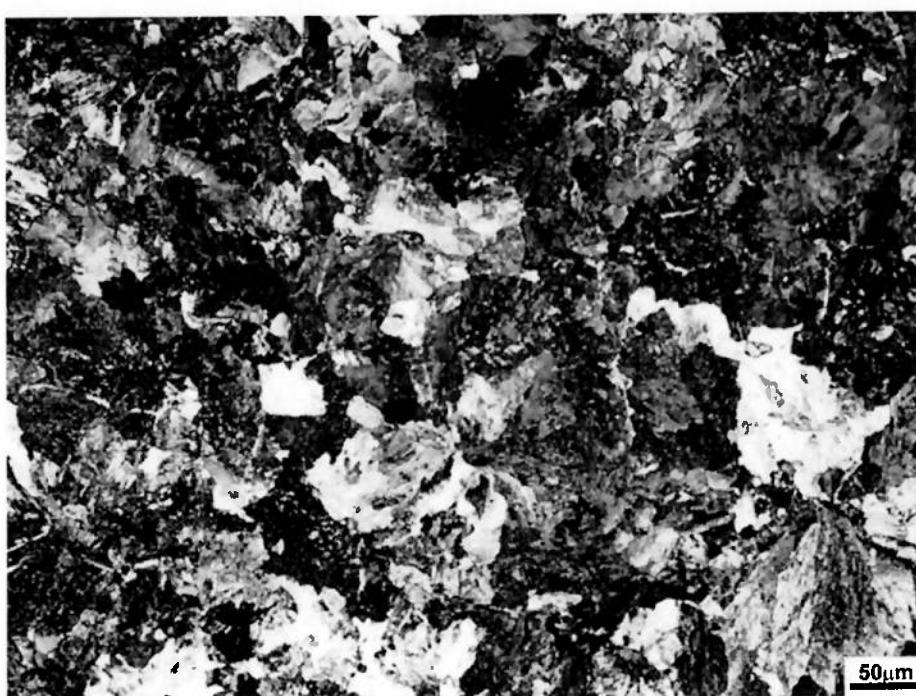


Figura 5.13 – Micrografia Metal de Base da Alma – aumento 20X

A Figura 5.14 apresenta um detalhe da microestrutura perlítica do Metal de Base, com algumas regiões mostrando a presença de ferrita no contorno de grão.

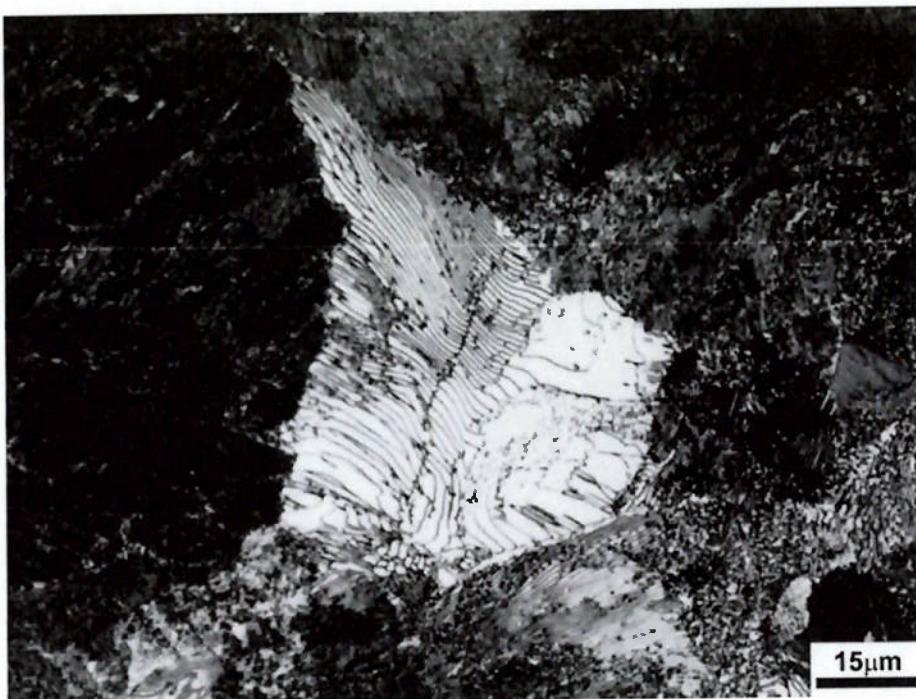


Figura 5.14 – Micrografia Metal de Base da Alma – aumento 100X

5.1.2.2.2. Início da Zona Afetada pelo Calor na Alma

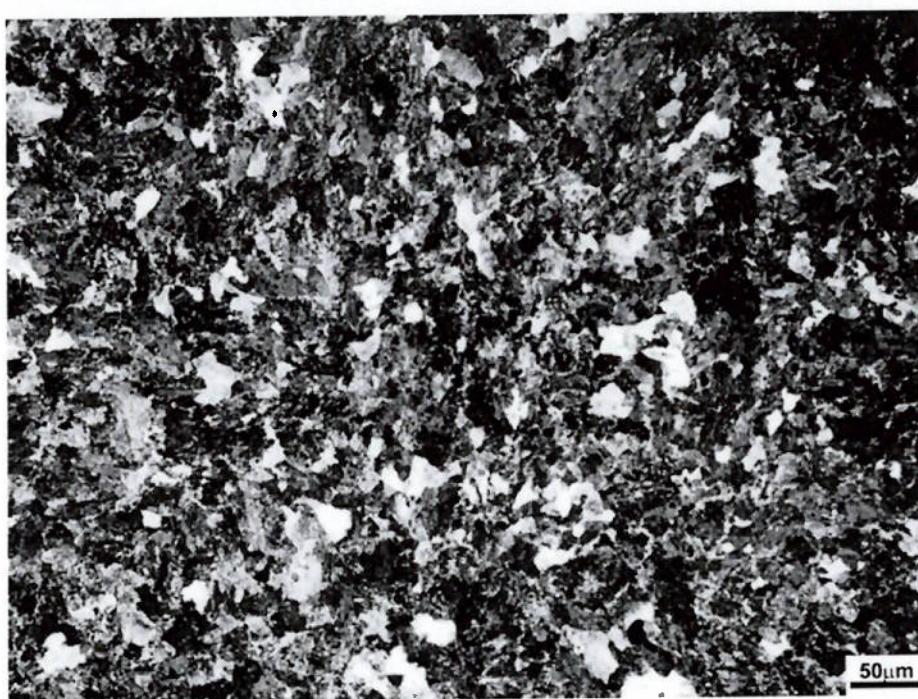


Figura 5.15 – Micrografia Início da ZAC da Alma – Aumento 20X

No início da Zona Afetada pelo Calor é possível notar a estrutura com grãos mais finos e a presença de ferrita nos contornos de grão, conforme

apresentado na Figura 5.15. A figura 5.16 mostra uma microestrutura similar a descrita na figura 5.13.



Figura 5.16 – Micrografia Início da ZAC da Alma – Aumento 100X

5.1.2.2.3. Centro da Zona Afetada pelo Calor na Alma

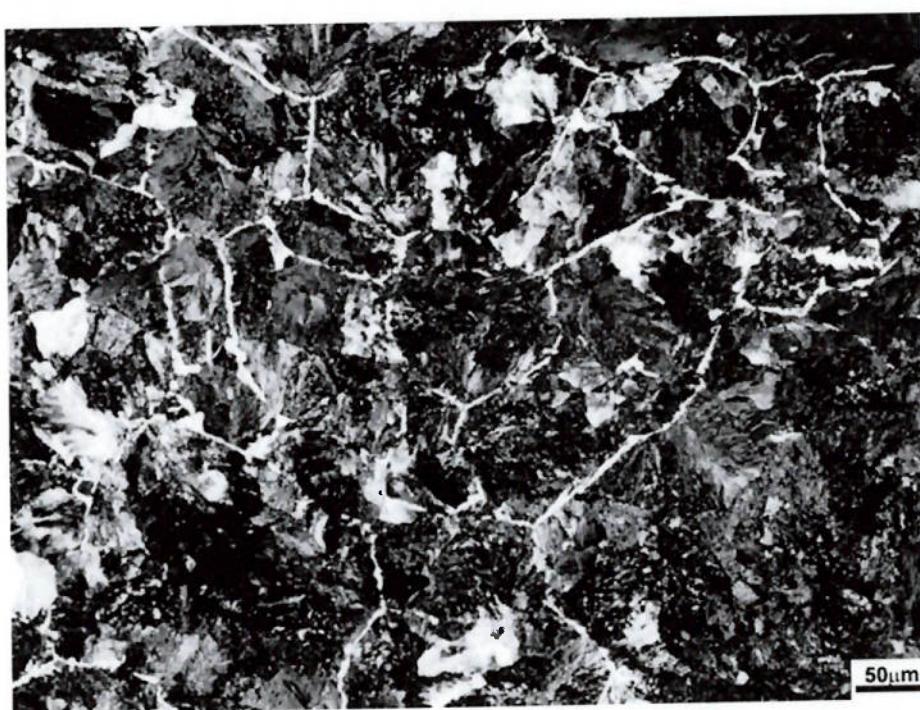


Figura 5.17 – Micrografia Centro da ZAC da Alma – Aumento 20X

Com as altas temperaturas podemos notar a dissolução dos carbonetos, o que gera a austenita a precipitação da ferrita nos contornos dos grãos, na Figura 5.17.



Figura 5.18 – Micrografia Centro da ZAC da Alma – Aumento 100X

Na Figura 5.18 podemos notar a ferrita se formando no contorno do grão.

5.1.2.2.4. Região da Zona Afetada com a Zona Fundida da Alma

É claro, na Figura 5.19, que a ferrita nesta fase se formou em torno de todo o grão do material, o que torna essa região uma estrutura mais dura e, consequentemente, mais frágil.



Figura 5.19 – Micrografia Final da ZAC com ZF da Alma – Aumento 20X

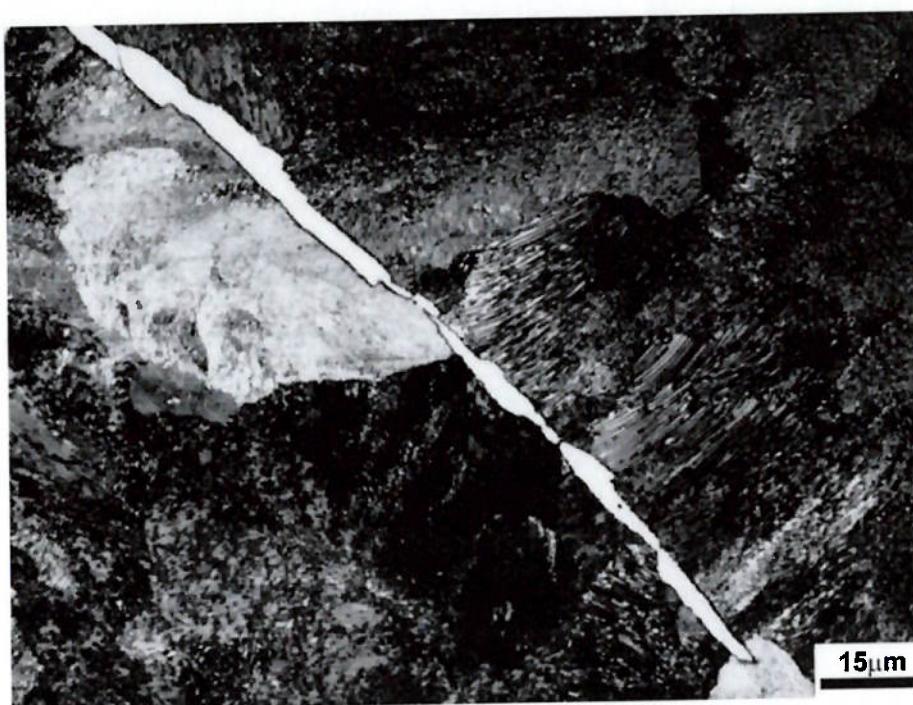


Figura 5.20 – Micrografia Final da ZAC com ZF da Alma – Aumento 100X

Na Figura 5.20 nota-se um crescimento significativo da ferrita no contorno do grão, conforme analisado na Figura 5.19. Por um lado, isso passa a ser preocupante, pois a fragilidade do material fica bem crítica.

5.1.2.2.5. Zona Fundida da Alma

Nesta fase encontramos apenas perlita fina e grossa, com uma leve formação de bainita.



Figura 5.21– Micrografia da ZF da Alma – Aumento 20X

Observa-se, na Figura 5.22, a presença predominante da perlita grossa, sem formação de ferrita no contorno do grão, o que pode confirmar que a dureza nessa região é menor que na zona afetada pelo calor.

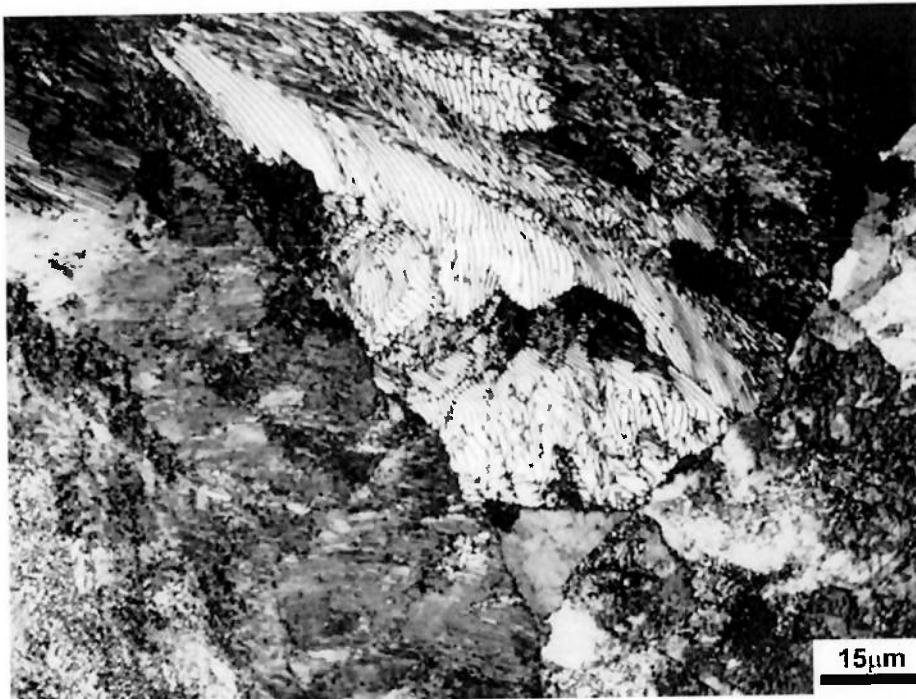


Figura 5.22 – Micrografia da ZF da Alma – Aumento 100X

5.1.2.3. PATIM

5.1.2.3.1. Metal de base no Patim



Figura 5.23 – Micrografia Metal de Base do Patim – aumento 20X

Na Figura 5.23 do metal de base tem-se a presença de perlita e ferrita. A figura 5.24 mostra a microestrutura em maior aumento.

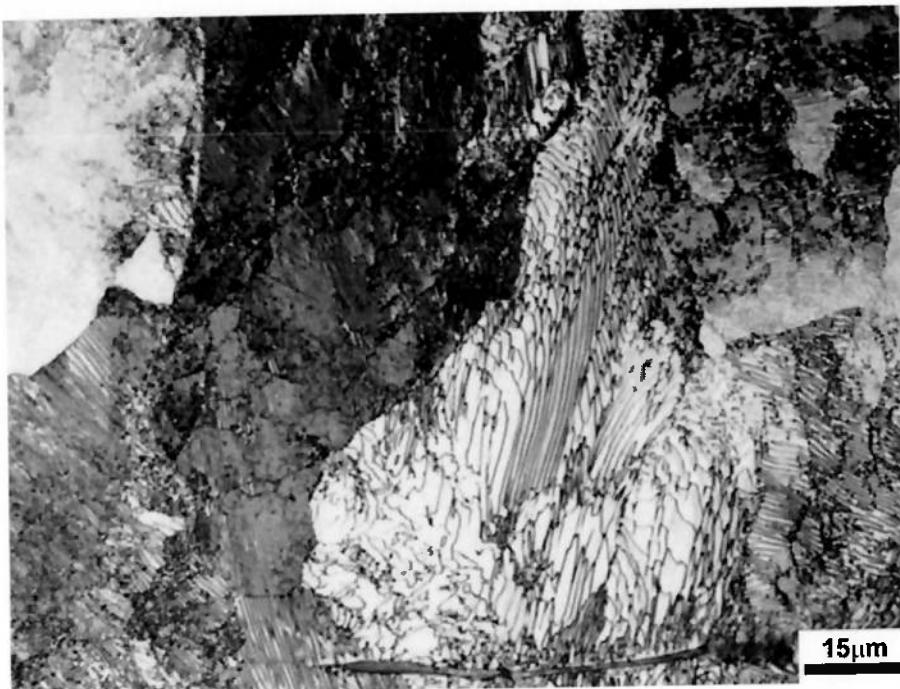


Figura 5.24 – Micrografia Metal de Base do Patim – aumento 100X

5.1.2.3.2. Início da Zona Afetada pelo Calor no Patim

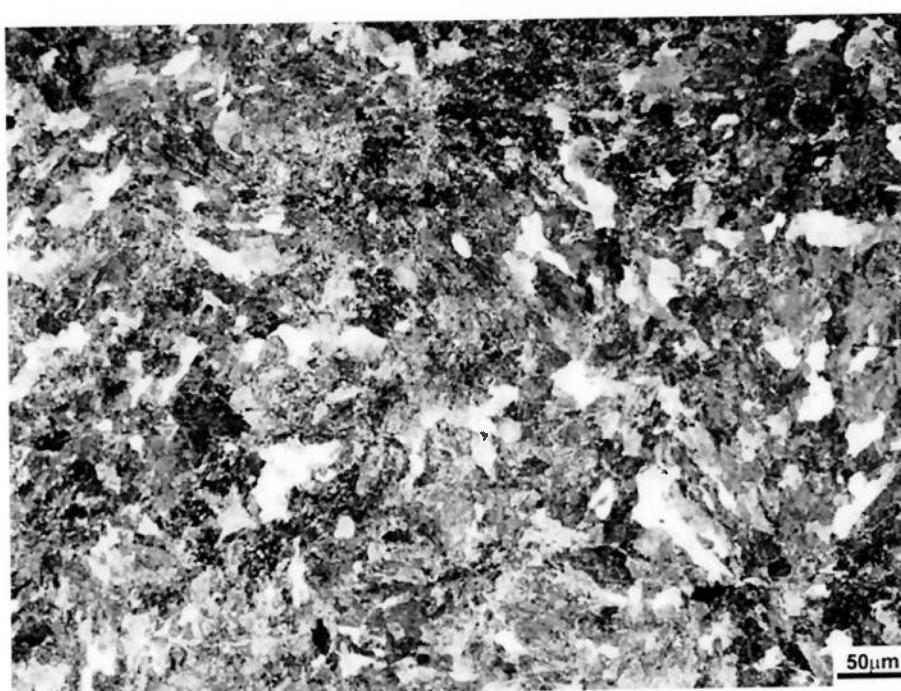


Figura 5.25– Micrografia Início da ZAC do Patim – Aumento 20X

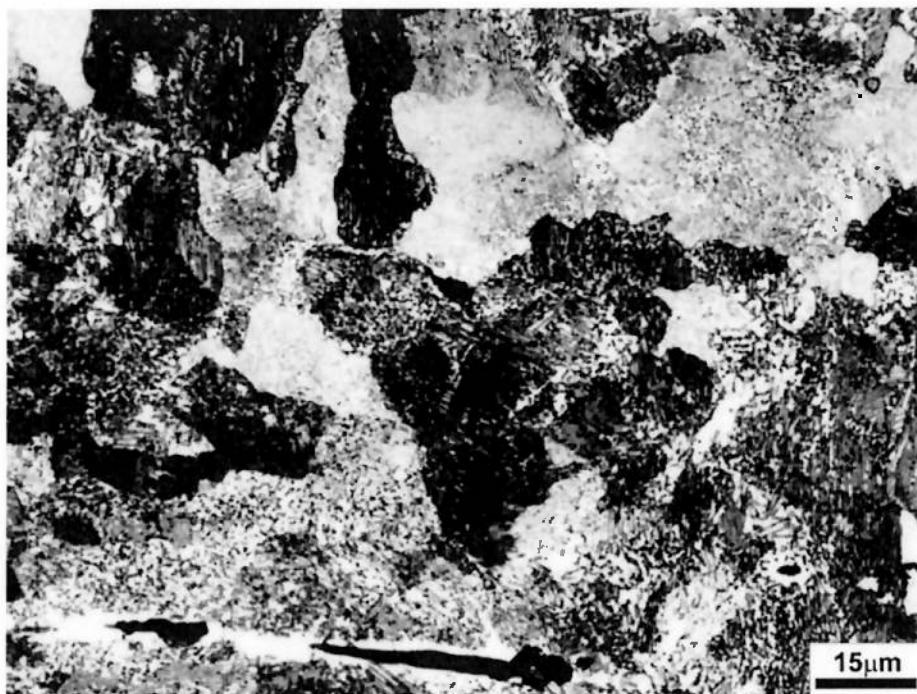


Figura 5.26 – Micrografia Início da ZAC do Patim – Aumento 100X

Na figura 5.25 percebe-se a presença de perlita e ferrita, além de uma mudança no tamanho de grãos, causada pelo aumento da temperatura. É possível observar também a presença de sulfeto de manganês no metal de base, mas vale notar a presença de perlita esboroada na região. A figura 5.26 mostra a microestrutura em maior detalhe.

5.1.2.3.3. Centro da Zona Afetada pelo Calor no Patim

Na matriz perlítica nota-se a precipitação de ferrita nos contornos de grãos e, ainda, regiões que preservam os sulfetos do material de base, pois se sabe que a temperatura no patim é relativamente menor que a do boleto. Por esta mudança microestrutural, a dureza na região apresenta um aumento significativo.

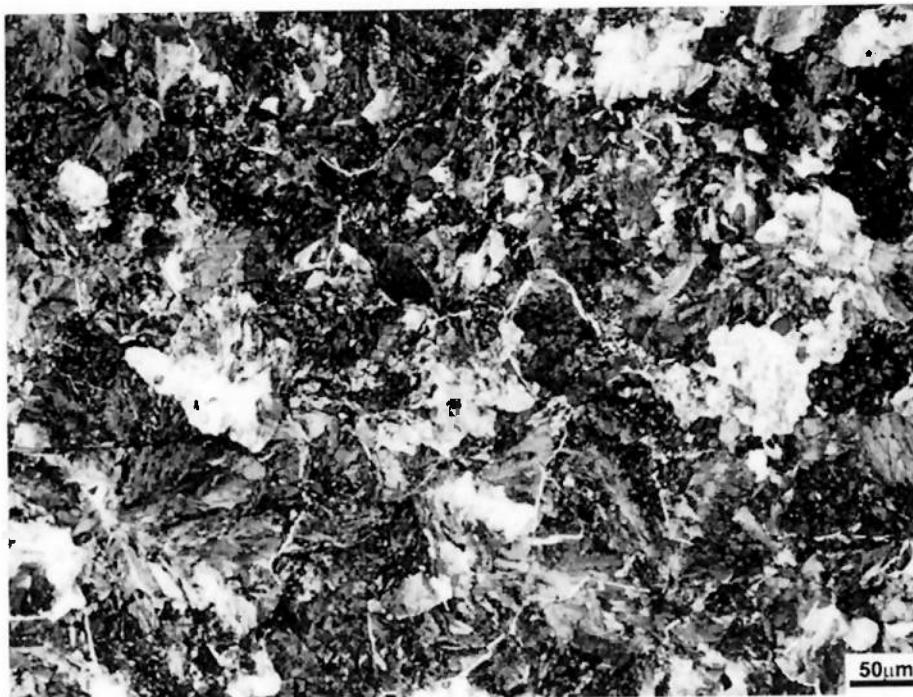


Figura 5.27– Micrografia Centro da ZAC do Patim – Aumento 20X



Figura 5.28 – Micrografia Centro da ZAC do Patim – Aumento 100X

5.1.2.3.4. Região da Zona Afetada com Calor e Zona Fundida do Patim

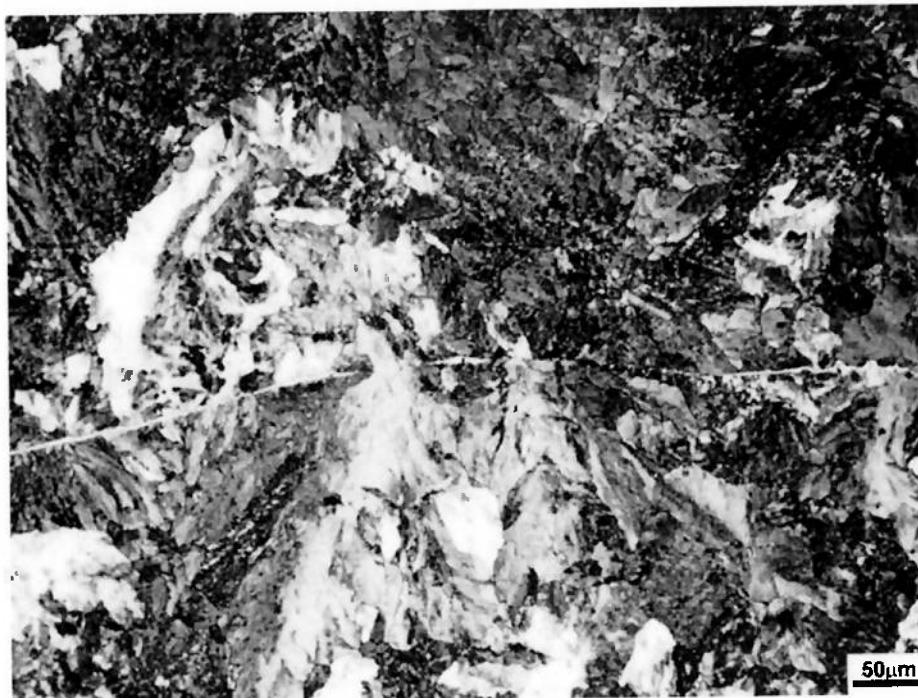


Figura 5.29– Micrografia Final da ZAC com ZF do Patim– Aumento 20X



Figura 5.30 – Micrografia Final da ZAC com ZF do Patim– Aumento 100X

Nas Figuras 5.29 e 5.30 se nota a presença crescente de ferrita em uma matriz perlítica.

5.1.2.3.5. Zona Fundida do Patim



Figura 5.31 – Micrografia da ZF do Patim – Aumento 20X

Como é a região que está no final da sedimentação do metal de solda, podemos notar algumas pequenas inclusões na figura 5.31. Já na Figura 5.32, notamos a presença significativa de perlita fina e grossa, além de ferrita.



Figura 5.32 – Micrografia da ZF do Patim – Aumento 100X

5.1.3. PERFIL DE DUREZA DO TRILHO

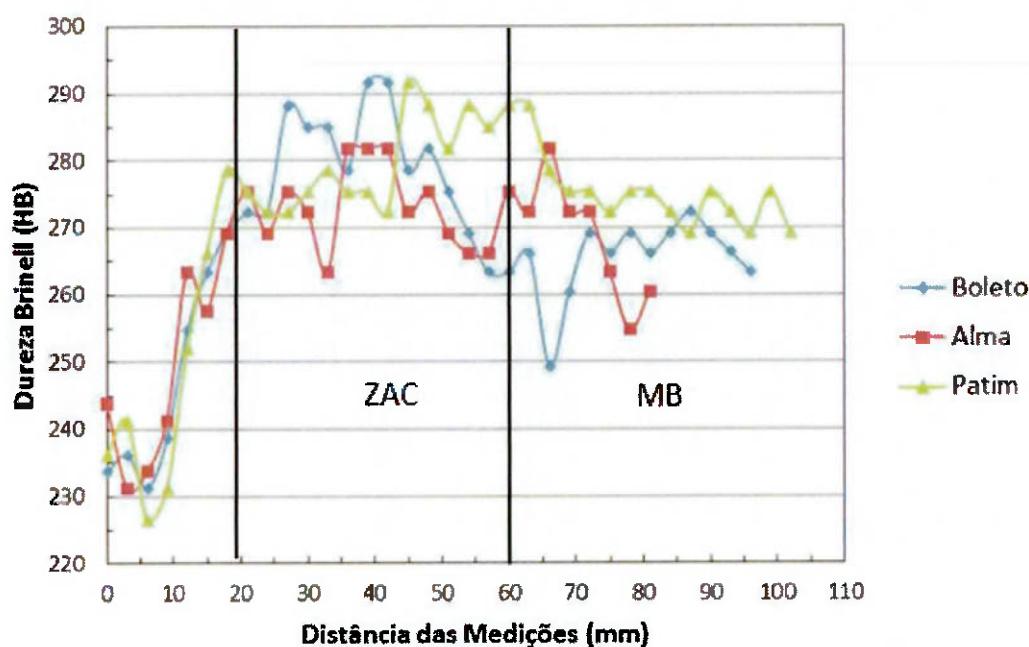


Figura 5.33 – Gráfico de Comparaçao de Dureza Brinell das três partes do Trilho

A Figura 5.33 representa a dureza das três regiões da junta soldada do trilho, respectivamente, Metal de Base, Zona Afetada pelo Calor e Zona Fundida.

Nota-se que a região da ZAC é aquela que, através do estudo micrográfico, apresenta uma grande presença de ferrita no contorno dos grãos.

5.1.3.1. BOLETO



Figura 5.34 – Macrografia do Teste de Dureza Brinell do Boleto

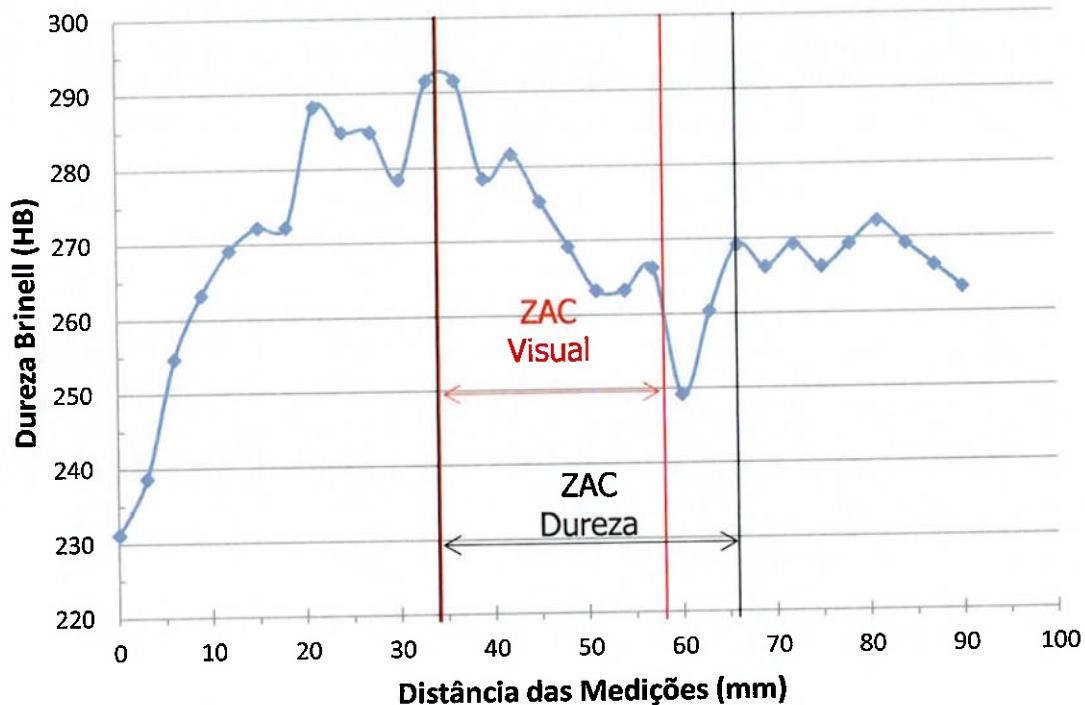


Figura 5.35 – Gráfico de Dureza Brinell do Boleto – Comparativo de ZAC Visual e ZAC Dureza

Na Figura 5.35, mostra-se os resultados visuais da macrografia com a curva de dureza na região do boleto de trilho.

Conforme foi identificado através de macragrafia, o limite da ZF com a ZAC é 34,8 mm do centro da ZF ao início da ZAC.

Ainda é possível afirmar, por essa mesma Figura, que a Extensão da ZAC, que no teste visual apresentava 23,3 mm, no teste de dureza apresenta 31,8 mm.

5.1.3.2. ALMA



Figura 5.36 – Macrografia do Teste de Dureza Brinell da Alma

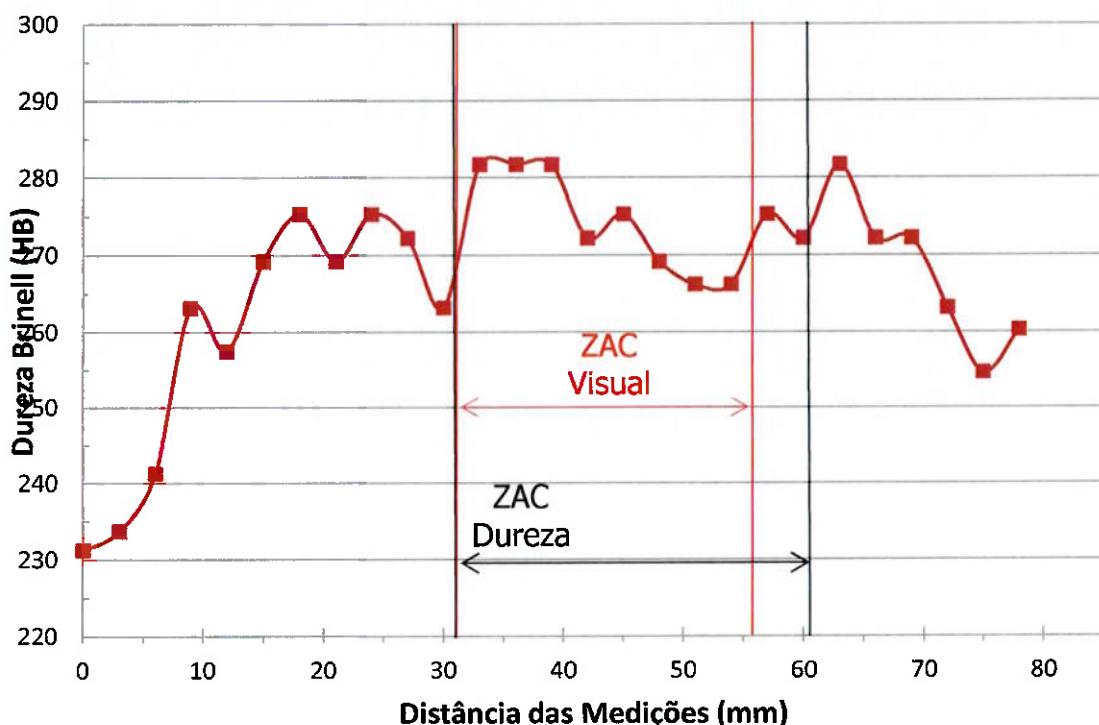


Figura 5.37 – Gráfico de Dureza Brinell da Alma – Comparativo de ZAC Visual e ZAC Dureza

Na Figura 5.37 comparamos os resultados visuais da macrografia com a curva de dureza na região da alma do trilho.

Conforme foi identificado através de macragrafia, o limite da ZF com a ZAC é 31,2 mm do centro da ZF ao início da ZAC.

Ainda é possível afirmar, por essa mesma Figura, que a Extensão da ZAC, que no teste visual apresentava 24,4 mm, no teste de dureza apresenta 29,3 mm.

5.1.3.3. PATIM

Na Figura 5.1.3.3.1 mostram-se os resultados visuais da macrografia com a curva de dureza na região do patim do trilho.

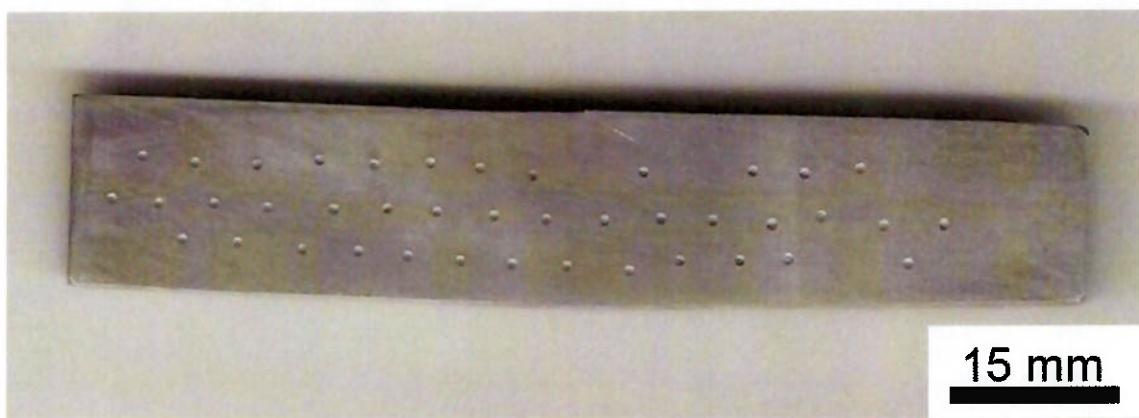


Figura 5.38 - Macrografia do Teste de Dureza Brinell do Patim

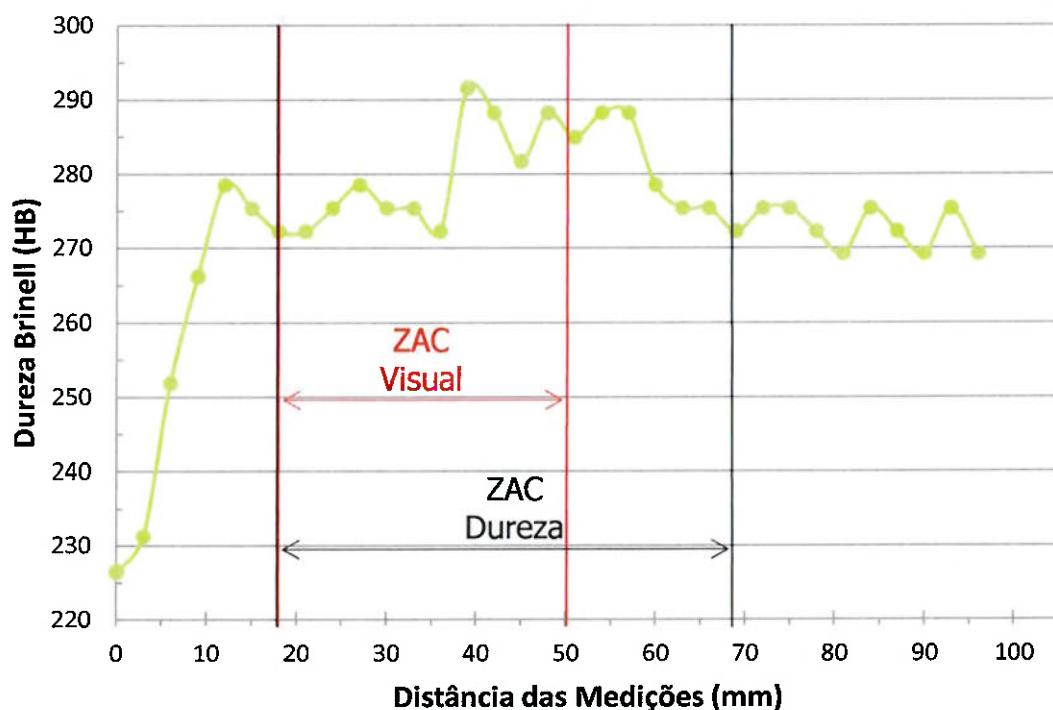


Figura 5.39 – Gráfico de Dureza Brinell do Patim– Comparativo de ZAC Visual e ZAC Dureza

Na Figura 5.39 comparamos os resultados visuais da macrografia com a curva de dureza na região da alma do trilho.

Conforme foi identificado através de macragrafia, o limite da ZF com a ZAC é 19,2 mm do centro da ZF ao início da ZAC.

Ainda é possível afirmar, por essa mesma Figura, que a Extensão da ZAC, que no teste visual apresentava 31,1 mm, no teste de dureza se apresenta em 49,6 mm.

6. CONCLUSÕES

Concluiu-se neste trabalho, através da análise da microestrutura, que:

A região da Alma e Patim do trilho apresentam uma maior fragilidade na ZAC, por possuir grande quantidade de ferrita nos contornos dos grãos.

Na macrografia pode-se notar no boleto, região com mais massa do trilho, uma ZF maior, pois é o local onde há maior pré-aquecimento e também o local que recebe diretamente o MS. Nas ouras regiões, a ZF afina-se.

No teste de dureza realizado mostrou-se maior dureza do ZAC, o que pode causar na linha férrea, caso receba uma grande carga, um canoamento na região da ZF ou após a ZAC, onde a dureza passa a ser menos que o MB.

Comparando a macrografia com o gráfico de dureza mostrou-se que, através da mudança de microestrutura do trilho, tanto a ZF quanto a ZAC são maiores que aquelas verificadas visualmente.

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Comparação de uma solda aluminotérmica normal e uma realizada em ângulo para determinar as diferenças;
- Comparação de uma solda aluminotérmica e uma realizada por caldeamento e determinar as diferenças.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELO, F. D. H. **Soldagem: Processos e Metalurgia.** São Paulo: Edgar Blücher, 1995.
2. **Aluminothermic Weld Defects.** Welding Technology Institute of Australia. <http://www.wtia.com.au/pdf/TGN-R-04%20Aluminothermic%20weld%20defects.pdf>. Acessado em junho/2011.
3. Valente S.p.a. http://www.valente.it/en/train_rails.htm. Acessado em outubro/2011.
4. ROSA, J. C. S. **Avaliação de Solda Aluminotérmica em Ângulo.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2008.
5. NETO, C. C. B. **Manual Didático de Ferrovias.** Departamento de Transportes da Universidade Federal do Paraná. 2011
6. **Manual for Railway Engeneering.** Vol 2. American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association. 2000.
7. **Manual do Soldador – Processos SoWoS – SkV.** 2^a edição. Thermit do Brasil Indústria e Comércio Ltda. 2003
8. **Memorial Descritivo de Processo – Troca de Trilhos.** Companhia do Metropolitano de São Paulo. 2011.
9. **Soldagem de Trilhos pelo Processo THERMIT com Nervura Achatada tipo SMF.** Thebra do Brasil Sociedade de Soldagens Térmicas Ltda. 1997