

**Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais**



**Dissertação de Mestrado**

**Alexandre Dias Gonçalves**

**ESTUDO COMPARATIVO DAS SOLDAS REALIZADAS COM OS  
PROCESSOS DE SOLDAGEM SMAW E TW APLICADOS NA UNIÃO DE  
TRILHOS A 100 DA NORMA DIN 536**

**Belo Horizonte**

**Setembro de 2016**

Alexandre Dias Gonçalves

**ESTUDO COMPARATIVO DAS SOLDAS REALIZADAS COM OS  
PROCESSOS DE SOLDAGEM SMAW E TW APLICADOS NA UNIÃO DE  
TRILHOS A 100 DA NORMA DIN 536**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Celeste Monteiro de Souza Costa

Coorientador: Dr. Marlon Rosa de Gouvea

**Belo Horizonte**

**Setembro de 2016**

Gonçalves, Alexandre Dias.

G635e      Estudo comparativo das soldas realizadas com os processos de soldagem SMAW e TW aplicados na união de trilhos A 100 da norma DIN 536 / Alexandre Dias Gonçalves. – 2016.

119 f.; il.; tabs. ; fotos. –

Orientadora: Maria Celeste Monteiro de Souza Costa.

Coorientador: Marlon Rosa de Gouvêa

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2016.

Bibliografia.

1. Soldagem. 2. Caracterização de materiais. 3. Microestrutura. 4. Carbono. I. Costa, Maria Celeste Monteiro de Souza. II. Gouvêa, Marlon Rosa de. III. Título.

CDD: 671.52



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

*DISSERTAÇÃO DE MESTRADO*  
*“ESTUDO COMPARATIVO DAS SOLDAS REALIZADAS*  
*COM OS PROCESSOS DE SOLDAGEM SMAW E TW NA*  
*UNIÃO DE TRILHOS A100 DA NORMA DIN 536”*

Autor: Alexandre Dias Gonçalves

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Celeste Monteiro de Souza Costa

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Celeste Monteiro de Souza Costa (ORIENTADORA)  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Marlon Rosa de Gouvêa (COORDINADOR)  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Elaine Carballo Siqueira  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Cláudio Turani Vaz  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG

Belo Horizonte, 06 de Outubro de 2016.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado saúde, sabedoria e por ter me apresentado o caminho sempre que as dificuldades se apresentaram em minha vida.

Aos meus pais Oni Dias e Edna Gonçalves dos Santos Dias pelo amor incondicional.

As minhas avós Santinha Gonçalves dos Santos (*in memoriam*) e Sílvia Maria de Jesus (*in memoriam*) pelo carinho eterno.

À minha Orientadora Maria Celeste Monteiro de Souza Costa pela orientação.

Ao meu Coorientador Dr. Marlon Rosa de Gouvea e a Dr.<sup>a</sup> Elaine Carballo Siqueira Corrêa pela orientação.

À equipe de usinagem, caldeiraria, ao Dayvison C. Almeida e Bruno S. Vieira de pontes rolantes da aciaria pelo apoio e preparação dos materiais utilizados nesta dissertação.

Ao Éder Lúcio do laboratório físico químico e a Gerdau Ouro Branco pela disponibilização total dos recursos para realização do trabalho.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais pelos recursos disponibilizados para realização desta pesquisa.

Ao Bruno Cordeiro Silva e equipe do Laboratório de Caracterização do DEMAT/CEFET-MG, Cláudio Moreira de Alcântara e Alexandre da Silveira Rodrigues pelo auxílio na execução das micrografias (MEV).

A Ludmila Santos Eufrásio pelo amor, companheirismo, amizade, paciência, carinho, atenção, incentivo e por estar sempre ao meu lado.

Ao Carlos Roberto Eufrásio e Enilce Santos Eufrásio pela orientação.

A todos que de alguma forma contribuíram com este trabalho.

## RESUMO

Os processos de soldagem são amplamente empregados na união de componentes de estruturas metálicas e de equipamentos para as finalidades mais diversificadas nas indústrias. A grande vantagem da soldagem sobre os demais processos de união consiste em sua simplicidade de operação e economia, uma vez que, a execução das juntas soldadas requer quantidades relativamente pequenas de material de deposição. Porém, problemas com a soldagem dos aços de alta resistência e baixa liga envolvem a instabilidade microestrutural destes, quando submetidos a ciclos térmicos de soldagem. Diante disto, o objetivo deste trabalho foi realizar um estudo comparativo das propriedades mecânicas (dureza e tração) e microestrutura encontrada em trilhos utilizados em movimentação de pontes rolantes de grande porte (capacidade de sustentação de cargas de 300 toneladas), do tipo A100 da norma DIN 536/1991, com variação percentual de carbono entre 0,4 e 0,6% (DIN 536 s700), e variação percentual de carbono entre 0,6 e 0,8% (DIN 536 s900), soldados com os processos “Shielded Metal Arc Welding” (SMAW) e “Thermite Welding” (TW). De acordo com os resultados obtidos, foi possível verificar que os metais de base dos trilhos em questão, possuem microestruturas distintas, sendo que o trilho DIN 536 s700 apresentou microestrutura composta por perlita e ferrita proeutetóide enquanto o trilho DIN 536 s900 apresentou microestrutura unicamente perlítica. Estas variações, aliadas aos processos de soldagem, acarretaram em soldas com diferentes características microestruturais e conseqüentemente com diferentes propriedades mecânicas. Foi possível observar a solda executada através do processo de soldagem TW com metal de base DIN 536 s900, apresentou limite de escoamento inferior ao cordão de solda executado com o processo de soldagem SMAW soldado com o mesmo metal de base, DIN 536 s900.

**PALAVRAS-CHAVE:** soldagem, trilhos, carbono.

## ABSTRACT

The welding processes are widely employed in the union of metal structures and equipment components for the most diverse purposes in industries. The great advantage of welding over other joining processes consists in its simplicity of operation and economy, since the performance of welded joints requires relatively small amounts of deposition material. However, problems with the welding of high strength low alloy steels involve microstructural instability of these, when subjected to thermal welding cycles. In view of this, the aim of this study was a comparative study of the mechanical properties (hardness and traction) and microstructure found in rails used in handling large cranes (carrying capacity loads 300 tons) of the type A100 standard DIN 536/1991 with carbon coefficient of variation between 0,4 and 0,6% (DIN 536 s700), and carbon percentage variation between 0.6 and 0.8% (S900 DIN 536), welded to the procedures of welding Shielded Metal Arc welding (SMAW) and Thermite welding (TW). According to the results, we found that the rails of the base metals in question have different microstructures, and the DIN rail 536 s700 presented microstructure consists of pearlite and ferrite proeutetóide while the DIN rail 536 S900 showed only pearlite microstructure. These changes, combined with the welding processes, resulted in solders with different microstructural characteristics and consequently with different mechanical properties. It was observed that the weld seam runs with TW welding process based metal DIN 536 S900, presented yield point below the weld seam runs with the soldier SMAW welding process with the same base metal, DIN 536 S900.

KEYWORDS: welding, rails, carbon.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>xii</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>xviii</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS</b> .....	<b>xx</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>22</b>
<b>2. Objetivos</b> .....	<b>24</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	24
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	24
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>25</b>
3.1 TRILHOS E PONTES ROLANTES .....	25
3.1.1 Trilhos.....	25
3.1.2 Características das ligas Ferro-Carbono aplicadas na fabricação de trilhos.....	28
3.1.3 Pontes Rolantes .....	30
3.2 SOLDAGEM.....	33
3.2.1 Definição.....	33
3.2.4 Metal de solda e zona termicamente afetada (ZTA).....	34
3.2.5 Fluxo de calor, aporte térmico e ciclo térmico de soldagem .....	35
3.2.7 Defeitos nos processos de soldagem .....	39

3.3	PROCESSO DE SOLDAGEM ALUMINOTÉRMICO – TW .....	41
3.3.1	Características do processo de soldagem TW .....	41
3.3.2	Consumíveis e equipamentos para soldagem TW .....	42
3.3.3	Parâmetros operacionais da soldagem TW .....	43
3.3.4	Propriedades mecânicas e metalúrgicas da solda TW .....	46
3.3.5	Defeitos na soldagem TW .....	48
3.4	PROCESSO DE SOLDAGEM ELETRODO REVESTIDO – SMAW ...	49
3.4.1	Características do processo de soldagem SMAW .....	49
3.4.2	Consumíveis e equipamentos de soldagem SMAW .....	50
3.4.3	Parâmetros operacionais da soldagem SMAW .....	53
3.4.4	Propriedades mecânicas e metalúrgicas da solda SMAW .....	55
3.4.5	Defeitos na soldagem SMAW .....	55
3.4.6	Eletrodo revestido E 9018D1 .....	56
<b>4.</b>	<b>PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>58</b>
4.1	DESCRIÇÃO GERAL DO TRABALHO .....	58
4.2	FLUXOGRAMA EXPERIMENTAL .....	61
4.3	PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM .....	62
4.3.1	Soldagem dos trilhos através do processo de soldagem SMAW .	63
4.3.2	Soldagem dos trilhos através do processo de soldagem TW .....	62
4.4	ENSAIOS MECÂNICOS E METALÚRGICOS.....	67

4.4.1	Macrografia longitudinal.....	67
4.4.2	Microscopia ótica e eletrônica de varredura .....	68
4.4.3	Ensaio de dureza.....	69
4.4.4	Ensaio de tração.....	71
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>73</b>
5.1	INTRODUÇÃO .....	73
5.2	RESULTADO DA SOLDAGEM REALIZADA COM O PROCESSO TW - METAL DE BASE AÇO DIN 536-S900 .....	73
5.2.1	Análise química do metal de base .....	73
5.2.2	Análise química do metal depositado .....	74
5.2.3	Resultados da macrografia longitudinal.....	76
5.2.4	Resultado da microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	77
5.2.5	Dureza Vickers .....	82
5.2.6	Tração .....	83
5.3	RESULTADO DA SOLDAGEM REALIZADA COM O PROCESSO SMAW - METAL DE BASE AÇO DIN 536-S900.....	86
5.3.1	Resultado da análise do metal de base.....	86
5.3.2	Resultado da análise do metal depositado .....	86
5.3.3	Macrografia longitudinal.....	88

5.3.4	Resultado da Microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	88
5.3.5	Dureza Vickers .....	93
5.3.6	Tração .....	94
5.4	RESULTADO DA SOLDAGEM REALIZADA COM O PROCESSO SMAW - METAL DE BASE AÇO DIN 536-S700.....	96
5.4.1	Resultado da análise do metal de base.....	96
5.4.2	Análise química do metal depositado .....	97
5.4.3	Resultados da macrografia longitudinal.....	99
5.4.4	Resultado da Microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	99
5.4.5	Dureza Vickers .....	105
5.4.6	Tração .....	106
5.5	ANÁLISE COMPARATIVA .....	108
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>110</b>
<b>7.</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>111</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>112</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Trilho da Norma DIN 536/1991.....	27
Figura 3.2 - Microestrutura perlítica encontrada em um segmento de trilho. ...	30
Figura 3.3 - Ponte Rolante utilizada para elevar e transladar cargas.....	31
Figura 3.4 - Figura esquemática dos componentes de uma ponte rolante.....	32
Figura 3.5 - Representação da zona termicamente afetada .....	35
Figura 3.6 - Ciclo Térmico de uma junta soldada .....	38
Figura 3.7 - Representação dos ciclos térmicos em várias posições de uma junta soldada.....	39
Figura 3.8 - Equipamentos utilizados na soldagem TW .....	43
Figura 3.9 - Representação esquemática do método SmW-F.....	44
Figura 3.10 - Representação esquemática do método SoWos .....	45
Figura 3.11 - Representação esquemática do método SKv-F.....	46
Figura 3.12 - Microestrutura de uma junta soldada utilizando processo de soldagem TW sem tratamento térmico.....	47
Figura 3.13 – Perfil de dureza transversal ao longo do perfil soldado.....	47
Figura 3.14 - Regiões da solda TW mais suscetíveis a falhas .....	48
Figura 3.15 - Desenho esquemático do processo SMAW .....	49
Figura 3.16 - Relação corrente de soldagem x cordão de solda .....	54
Figura 4.1 - Trilho A100 da norma DIN 536 .....	59

Figura 4.2 - Moldes refratários utilizados no processo TW, .....	60
Figura 4.3 - Fluxograma experimental.....	61
Figura 4.4 – Preparação do trilho para realização do processo TW.....	63
Figura 4.5 – Pré-aquecimento e rebarbagem.....	63
Figura 4.6 – Trilhos preparados para soldagem através do processo SMAW .	64
Figura 4.7 - Representação 3D do trilho soldado através do processo SMAW	67
Figura 4.8 – Aspecto macroestrutural de uma junta soldada .....	67
Figura 4.9 – Corpo de prova preparado para ensaio macrográfico .....	68
Figura 4.10 – Preparação do corpo de prova para ensaio micrográfico.....	69
Figura 4.11 – Corpo de prova para medição de dureza na superfície.....	70
Figura 4.12 - Corpo de prova para medição de dureza na seção transversal ..	70
Figura 4.13 – Regiões de retirada dos corpos de prova de tração.....	71
Figura 4.14 – Padrão para confecção dos corpos de prova de tração .....	72
Figura 4.15 – Corpo de prova confeccionado para realização do ensaio de tração, conforme Norma ASTM A 370 .....	72
Figura 5.1 – Aspecto macroestrutural do processo TW soldado com Aço DIN 536 S900.....	76
Figura 5.2 - Aspecto microestrutural do metal de base trilho A100 soldado com Aço DIN 536 S900 com aumentos de 100(FIG.A) e 500(FIG.B) vezes.....	77
Figura 5.3 - Aspecto microestrutural do metal de base trilho A100 soldado com Aço DIN 536 S900 com aumentos de 2000(FIG.A) e 4000(FIG.B) vezes.....	78

Figura 5.4 - Aspecto microestrutural do metal depositado soldado através do processo TW com Aço DIN 536 S900 com aumentos de 50(FIG.A) e 100(FIG.B) vezes.....	78
Figura 5.5 - Aspecto microestrutural do metal depositado soldado através do processo TW com aumento de 500 vezes .....	79
Figura 5.6 - Aspecto microestrutural do metal depositado soldado através do processo TW soldado com Aço DIN 536 S900 com aumentos de 2000(FIG.A) e 4000(FIG.B) vezes .....	79
Figura 5.7 – Microestrutura na zona de transição metal de base com a ZTA no processo de soldagem TW soldado com Aço DIN 536 S900 com 25 vezes de aumento. ....	80
Figura 5.8 – Microestrutura na zona de transição entre a ZTA e o metal depositado no processo de soldagem TW soldado com Aço DIN 536 S900 com 25 vezes de aumento .....	80
Figura 5.9 – Microestrutura na zona de transição entre o metal de base e a ZTA no processo de soldagem TW soldado com Aço DIN 536 S900 com aumentos de 50(FIG.A) e 500(FIG.B) vezes.....	81
Figura 5.10– Microestrutura na ZTA próximo ao metal depositado com aumento de 100(FIG.A) e 500(FIG.B) vezes no processo de soldagem TW soldado com Aço DIN 536 S900.....	81
Figura 5.11 – Microestrutura na ZTA próximo ao metal depositado com aumento de 1000(FIG.A) e 4000(FIG.B) vezes no processo de soldagem TW soldado com Aço DIN 536 S900.....	82
Figura 5.12 – Perfil de dureza transversal ao longo do perfil soldado através do processo TW com Aço DIN 536 S900.....	83
Figura 5.13 – Corpo de prova rompido após realização do ensaio de tração. .	84

Figura 5.14 – Limite de escoamento metal de base e trilho soldado processo TW soldado com Aço DIN 536 S900 .....	84
Figura 5.15 – Limite de resistência metal de base e trilho soldado processo TW soldado com Aço DIN 536 S900 .....	85
Figura 5.16 - Alongamento percentual metal de base e trilho soldado processo TW soldado com Aço DIN 536 S900 .....	85
Figura 5.17 – Aspecto macroestrutural da soldagem com processo SMAW soldado com Aço DIN 536 S900 .....	88
Figura 5.18 - Aspecto microestrutural do metal de base trilho A100 soldado com Aço DIN 536 S900 com aumentos de 100(FIG.A) e 500(FIG.B) vezes.....	89
Figura 5.19 - Aspecto microestrutural do metal depositado soldado através do processo SMAW soldado com Aço DIN 536 S900 com aumentos de 500(FIG.A) e 1000(FIG.B) vezes. ....	89
Figura 5.20 - Aspecto microestrutural do metal depositado soldado através do processo SMAW soldado com Aço DIN 536 S900 com aumentos de 2000(FIG.A) e 4000(FIG.B) vezes. ....	90
Figura 5.21 - Microestrutura na ZTA no processo de soldagem SMAW soldado com Aço DIN 536 S900 com aumento de 25 vezes. ....	91
Figura 5.22 - Microestrutura na transição metal de base e ZTA no processo de soldagem SMAW soldado com Aço DIN 536 S900 com aumentos de 50(FIG.A) e 100(FIG.B) vezes. ....	91
Figura 5.23 – Microestrutura na ZTA próximo ao metal de base soldado com processo SMAW soldado com Aço DIN 536 S900 com 500(FIG.A) e 2000(FIG.B) vezes .....	92

Figura 5.24 - Microestrutura na transição metal depositado e ZTA no processo de soldagem SMAW soldado com Aço DIN 536 S900 com aumentos de 500 vezes .....	92
Figura 5.25 – Microestrutura na ZTA próximo ao metal depositado soldado com processo SMAW soldado com Aço DIN 536 S900 com aumento de 1000(FIG.A) e 2000(FIG.B) vezes .....	93
Figura 5.26 – Perfil de dureza transversal ao longo do perfil soldado através do processo SMAW com Aço DIN 536 S900 .....	94
Figura 5.27 – Limite de escoamento metal de base do trilho soldado através processo SMAW com Aço DIN 536 S900 .....	95
Figura 5.28 - Limite de resistência metal de base do trilho soldado através processo SMAW com Aço DIN 536 S900 .....	95
Figura 5.29 - Alongamento percentual metal de base do trilho soldado através processo SMAW com Aço DIN 536 S900 .....	96
Figura 5.30 – Aspecto macroestrutural do processo SMAW soldado com Aço DIN 536 S700 .....	99
Figura 5.31 – Aspecto microestrutural do metal de base trilho A100 soldado com Aço DIN 536 S700 com aumentos de 100(FIG.A) e 500(FIG.B) vezes.....	100
Figura 5.32 - Aspecto microestrutural do metal depositado soldado através do processo SMAW Aço DIN 536 S700 com aumentos de 500 vezes. ....	100
Figura 5.33 - Aspecto microestrutural do metal depositado soldado através do processo SMAW soldado com Aço DIN 536 S700 com aumentos de 500 vezes .....	101
Figura 5.34 - Aspecto microestrutural do metal depositado soldado através do processo SMAW soldado com Aço DIN 536 S700 com aumentos de 500(FIG.A) e 1000(FIG.B) vezes. ....	102

Figura 5.35 - Microestrutura na ZTA no processo de soldagem SMAW com Aço DIN 536 S700.....	102
Figura 5.36 - Microestrutura na ZTA no processo de soldagem SMAW Aço DIN 536 S700.....	103
Figura 5.37 - Microestrutura na transição metal de base e ZTA no processo de soldagem SMAW Aço DIN 536 S700	
Figura 5.38 - Microestrutura na transição ZTA com metal de base no processo de soldagem SMAW Aço DIN 536 S700. ....	104
Figura 5.39 - Microestrutura na transição da ZTA com metal de base no processo de soldagem SMAW Aço DIN 536 S700 .....	104
Figura 5.40 - Microestrutura na transição da ZTA com metal de base no processo de soldagem SMAW Aço DIN 536 S700 .....	105
Figura 5.41 – Perfil de dureza transversal ao longo do perfil soldado através do processo SMAW com Aço DIN 536 S700 .....	106
Figura 5.42 - Limite de escoamento metal de base e trilho soldado processo SMAW com Aço DIN 536 S700.....	107
Figura 5.43 - Limite de escoamento metal de base e trilho soldado processo SMAW com Aço DIN 536 S700.....	107
Figura 5.44 - Alongamento percentual metal de base e trilho soldado processo SMAW com Aço DIN 536 S700.....	108

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Características trilhos norma DIN 536/1991.....	26
Tabela 3.2 – Especificação AWS para classificação de eletrodos revestidos ..	52
Tabela 3.3 – Faixas típicas de parâmetros elétricos de operação para diferentes eletrodos.....	53
Tabela 3.4 – Parâmetros de soldagem eletrodo revestido E 9018D1 .....	57
Tabela 3.5 –Propriedades mecânicas eletrodo revestido E 9018D1 .....	57
Tabela 4.1 - Composição química (% em peso) dos metais de base.....	58
Tabela 4.2 – Informações acerca trilho A 100 Norma DIN 536 .....	59
Tabela 4.3 - Propriedades mecânicas trilho A100 Norma DIN 536 .....	59
Tabela 4.4 – Parâmetros especificados para realização da soldagem TW .....	62
Tabela 4.5 - Composição química para consumível AWS E 9018 D1.....	64
Tabela 4.6 - Temperatura de pré-aquecimento Recomendada x Ceq .....	65
Tabela 4.7 - Parâmetros para realização da soldagem com processo SMAW	66
Tabela 5.1 - Composição química (% em peso) do metal de base trilho DIN 536-S900.....	74
Tabela 5.2 - Composição química (% em peso) do metal depositado trilho DIN536-S900 soldado com o processo de soldagem TW .....	75
Tabela 5.3 - Composição química (% em peso) do metal de base trilho DIN536 S900.....	86

Tabela 5.4 - Composição química (% em peso) do metal depositado trilho DIN536-S900 soldado com o processo de soldagem SMAW ..... 87

Tabela 5.5 - Composição química (% em peso) do metal de base trilho DIN 536 S700..... 97

Tabela 5.6 - Composição química (% em peso) do metal depositado trilho DIN536 S700 soldado com o processo de soldagem SMAW ..... 98

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

C	Calor específico
CA	Corrente alternada
CC-	Corrente contínua polaridade direta
CC+	Corrente contínua polaridade inversa
CC	Custo dos consumíveis
CD	Custo de depreciação
CE	Custo da energia elétrica
CM	Custo de manutenção
CP	Corpo de prova
CT	Custo Total
CCC	Cúbica de corpo centrado
CFC	Cúbica de face centrada
CMO	Custo de mão de obra
DHH	Deep Head Hardened
E	Energia de soldagem
FCAW	Flux-Cored Arc Welding
FHT	Full Heat Treated
GMAW	Gás metal arc welding
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
HV	Dureza Vickers
HH	Head Hardned
h	Espessura da chapa

I	Corrente de soldagem
k	Condutividade térmica
MB	Metal de Base
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
$\eta$	Eficiência térmica do processo
PAW	Plasma Arc Welding
$\rho$	Densidade
SAW	Submerged Arc Welding
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
T	Temperatura na qual estima-se a velocidade de resfriamento °C
$T_0$	Temperatura inicial da chapa °C
$T_c$	Temperatura crítica
TCC	Tetragonal de corpo centrado
$T_p$	Temperatura de pico
$t_p$	temperatura crítica
TW	Thermit Welding
V	Tensão no arco elétrico em volts
v	Velocidade de soldagem em mm/s.
$\phi$	Velocidade de resfriamento
$\phi_f$	Velocidade de soldagem em uma chapa fina
$\phi_g$	Velocidade de soldagem em uma chapa grossa
ZTA	Zona termicamente afetada

## 1. INTRODUÇÃO

A soldagem é amplamente empregada na união de componentes de estruturas metálicas e de equipamentos para as finalidades mais diversificadas. A soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (Shielded Metal Arc Welding – SMAW), é um dos processos mais empregados dentre os vários existentes, sendo bastante versátil, geralmente utilizado de forma manual, podendo ser empregado praticamente em qualquer situação, desde locais com grande influência de ventos até mesmo em soldas subaquáticas.

Apesar do processo SMAW ser bastante versátil, possui baixa produtividade quando correlacionado a outros como, por exemplo, o processo MIG/MAG (Gas Metal Arc Welding – GMAW). Além da produtividade, cuidados especiais são necessários com o armazenamento e manuseio dos consumíveis deste processo, que tendem a absorver água caso não sejam armazenados corretamente, acarretando em problemas no cordão de solda. Por fim, o processo SMAW gera grande volume de gases e fumos durante a soldagem.

A soldagem aluminotérmica (Thermite Welding – TW) não possui relação com outros processos de soldagem conhecidos, como por exemplo, o processo de soldagem por eletrodo revestido. Possui aplicação específica onde, geralmente, outros processos não apresentam flexibilidade necessária para a sua realização em campo. Devido à sua relativa simplicidade e independência de fontes externas de energia, a aluminotermia consagrou-se como um dos métodos mais empregados na soldagem de trilhos. Como em todo processo de soldagem, um procedimento de união mal executado, pode acarretar em consequências indesejáveis, resultando em falha prematura.

O presente trabalho analisa as características microestruturais e propriedades mecânicas dos processos de soldagem Shielded Metal Arc Welding (SMAW) e

Thermite Welding (TW) aplicados na união de trilhos do tipo A100 da norma DIN 536/1991, utilizados em movimentação de pontes rolantes de grande porte (capacidade de sustentação de cargas de 300 toneladas). No atual estágio de desenvolvimento da siderurgia, é conhecido que os principais elementos responsáveis pelo aumento da resistência do aço são o carbono, manganês e cromo. Dessa forma, observa-se a utilização cada vez maior de trilhos com percentual de carbono entre 0,6 e 0,9% e teores consideráveis de manganês e cromo, denominados de trilhos perlíticos. Contudo, altos percentuais de carbono (acima de 0,5 %), influenciam diretamente a soldabilidade dos aços, sendo que, quanto maior quantidade de carbono presente na estrutura, mais difícil a realização da solda. Isso se deve à formação de microestruturas martensítica e bainíticas, que possuem elevada dureza aliada à baixa tenacidade, acarretando na formação de trincas a frio.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Este trabalho tem como objetivo geral relacionar as propriedades mecânicas (limite de escoamento, limite de resistência, alongamento e dureza) com as características microestruturais das soldas realizadas por meio dos processos de soldagem SMAW e TW, aplicados na união de trilhos A100, utilizando os aços DIN 536-S700 e DIN 536-S900, visando identificar qual método mais eficiente a ser aplicado não união destes trilhos.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Realizar soldas utilizando os processos de soldagem TW e SMAW e os aços DIN 536-S700 e DIN 536-S900.

Realizar ensaios mecânicos utilizando corpos de prova confeccionados a partir das soldas executadas através dos processos SMAW e TW.

Realizar análise metalográfica das soldas executadas a partir dos processos SMAW e TW, visando identificação das microestruturas.

Avaliar qual aço (DIN 536 S700 ou DIN 536 S900) aliados aos processos de soldagem TW e SMAW, conferem características mecânicas desejáveis para aplicação em soldas de trilhos de pontes rolantes de grande porte (capacidade de sustentação de 300 toneladas).

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 TRILHOS E PONTES ROLANTES

##### 3.1.1 Trilhos

Trilhos são vigas longas de aço, resistentes ao desgaste, choques e ações mecânicas, com forma ou perfil especial sobre a qual trafegam e são guiadas as rodas do equipamento de tração e do material rodante rebocado (LEAL, 2006).

Os trilhos são assentados sobre os dormentes e transferem para estes as solicitações do material rodante da via. Possuem ainda a função de sustentação e condução dos trens, apresentando características estruturais de uma viga extensa e contínua (ROSA, 2008).

O perfil do trilho possui três regiões distintas: boleto, patim e a alma. Quando laminados, os trilhos possuem limitação de comprimento, tendo sua fabricação variando entre 12 e 36 metros. Geralmente, estes trilhos são aplicados em construção com longas distâncias, sendo necessária a utilização de processos de união, como por exemplo, a soldagem.

O boleto corresponde à parte do trilho destinada ao apoio e deslocamento da roda ferroviária. A grande massa concentrada no boleto é justificada pelo desgaste e atrito que o mesmo sofre no contato com as rodas do trem. Essa configuração favorece a resistência a flexão, pois há maior concentração de massa onde atuam mais tensões normais, permitindo otimizar o uso deste material (PORTO 2004).

A alma é definida como a parte do trilho compreendida entre o boleto e o patim. A resistência a flexão depende da espessura e da altura da alma e, evidentemente, deve-se ter uma espessura mínima para assegurar rigidez transversal. O patim é a base inferior do trilho, através do qual o trilho é apoiado e fixado nos dormentes que

recebem e transmitem os esforços produzidos pelas cargas ao lastro que são geralmente de pedra britada e cascalho.

Devido as suas condições de serviço, os trilhos devem possuir propriedades mecânicas e metalúrgicas que reúnam as seguintes características (ROLDÓ, 1998):

- Elevados limites de resistência mecânica aliada a 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.

Os trilhos utilizados como objeto de estudo neste trabalho foram desenvolvidos de acordo com a norma Alemã DIN 536/1991. Os trilhos desta norma possuem base ampla e baixo centro de gravidade, sendo ideais para altos impulsos laterais. Estes trilhos estão disponíveis no mercado em vários tamanhos, variando de A 45 até A 150, nomenclatura cujos números representam a largura do boleto, em milímetros (DIN 536/1991). A TAB. 3.1 apresenta características dos trilhos da norma DIN536/1991

**Tabela 3.1 - Características trilhos norma DIN 536/1991**

Perfil	Peso	Base	Altura	Boleto	Alma
	(kg/m)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
A45	22,1	125	55	45	24
A55	31,8	150	65	55	31
A65	43,1	175	75	65	38
A75	56,2	200	85	75	45
A100	74,3	200	95	100	60
A120	100,0	220	105	120	72
A150	150,3	220	150	150	80

Fonte: Norma DIN 536/1991

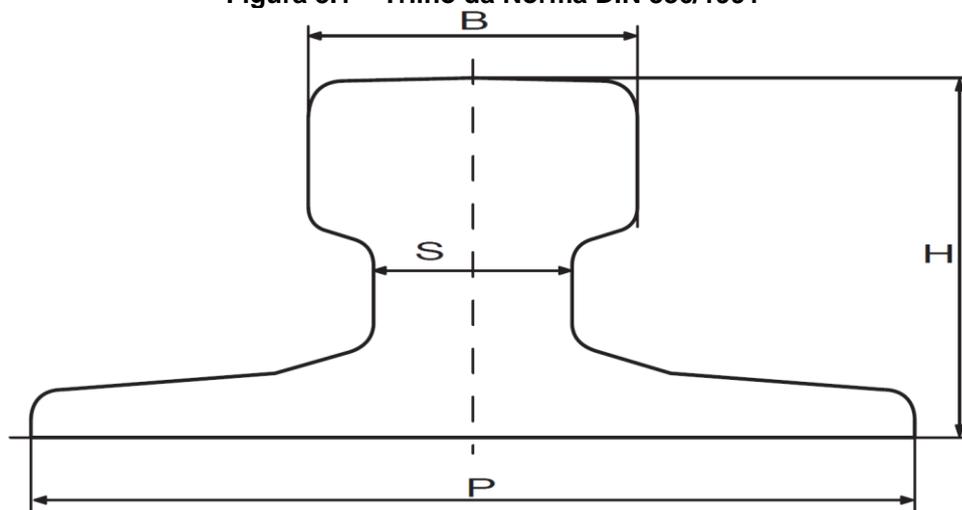
Recentemente, devido a um aumento progressivo das cargas verticais, os requisitos para desenvolvimento de trilhos com uma superfície de maior dureza foram requeridos

pelo mercado industrial. Em concordância com este fato, a indústria metalúrgica tem proporcionado constantes melhorias na produção de trilhos com variadas composições químicas, cujas propriedades mecânicas variam de acordo com os tratamentos térmicos empregados e a microestrutura deles resultante. Entre os tratamentos térmicos empregados para trilhos destacam-se:

- Boleto Endurecido (Head Hardened – HH);
- Boleto Profundamente Endurecido (Deep Head Hardened – DHH);
- Trilho completamente tratado (Full Heat Treated – FHT).

A diferença nos tratamentos térmicos está relacionada diretamente com a profundidade do endurecimento do boleto, sendo de aproximadamente 30 mm para os trilhos HH. No trilho DHH a dureza máxima ocorre a uma profundidade de até 45 mm, enquanto no trilho FHT, toda a seção transversal é tratada termicamente (MARICH, 1994). A forma esquemática de um trilho da norma DIN 536/1991, com suas respectivas regiões, estão representados na FIG. 3.1.

Figura 3.1 – Trilho da Norma DIN 536/1991



P - Patim  
H - Altura  
B - Boleto  
S - Alma

Fonte: jcpennypromocode.biz

### 3.1.2 Características das ligas Ferro-Carbono aplicadas na fabricação de trilhos

Os aços, que são essencialmente ligas de ferro-carbono, oferecem exemplos da maioria das reações e microestruturas disponíveis para o engenheiro, a fim de ajustar as prioridades dos materiais (VAN VLACK, 2000).

No estágio atual do desenvolvimento da siderurgia, sabe-se que os principais elementos responsáveis para o aumento da sua resistência são o carbono, manganês e cromo (SARTORI, 2010).

Dessa forma, observa-se nas usinas um número cada vez maior de trilhos com percentual de carbono entre 0,6 e 0,9% e teores consideráveis de manganês e cromo, denominados de trilhos perlíticos (SARTORI, 2010).

Problemas com a soldagem dos aços de alta resistência e baixa liga envolvem a instabilidade microestrutural destes, quando submetidos aos ciclos térmicos da soldagem. No caso dos trilhos estudados neste trabalho, a microestrutura encontrada é resultado da composição química do mesmo aliada ao processamento termomecânico, originadas do processo de soldagem. Esta combinação resulta, geralmente, em estruturas perlíticas, martensíticas e até mesmo bainíticas.

Ferro puro ou aços que contenham teores de carbono abaixo do limite de solubilidade da cementita na fase CCC (cúbica de corpo centrado) são essencialmente monofásicos, chamada ferrita a temperatura ambiente (COLPAERT, 2008).

O aquecimento da ferrita, em aços Fe-C, leva a formação da fase CFC (cúbica de face centrada), chamada austenita. Quando a solubilidade do carbono na ferrita é excedida, a cementita começa a aparecer na estrutura do aço (COLPAERT, 2008).

O diagrama Fe-C apresenta um equilíbrio eutetóide entre ferrita, cementita e austenita, a 727 °C. O ponto eutetóide é a menor temperatura de equilíbrio entre a ferrita e a austenita, correspondendo a cerca de 0,77% de carbono a 727 °C. Tendo em vista estas características, os aços podem ser denominados eutetóides,

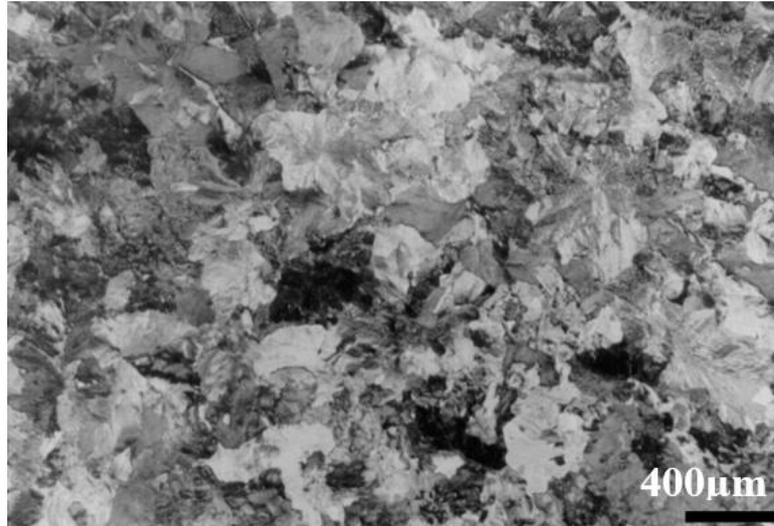
hipoeutetóides ou hipereutetóides, onde o termo eutetóide refere-se ao equilíbrio entre as fases líquida e sólida.

Quando aços contendo alto teor de carbono transformam-se para o campo abaixo da temperatura eutetóide, as fases esperadas são ferrita e cementita. Acredita-se que a nucleação inicial de cementita remove carbono da austenita situada em volta, favorecendo a nucleação da ferrita. A partir disso, os dois núcleos avançariam enquanto a nucleação de outras placas, também chamadas de lamelas, de mesma orientação, prosseguiria, dando origem às chamadas colônias de perlita, que podem ser identificadas como conjunto de lamelas de ferrita e cementita com a mesma orientação cristalográfica. (COLPAERT, 2008).

As transformações de fases que envolvem a formação de ferrita e de cementita, e conseqüentemente, de perlita, dependem do movimento de átomos por difusão. A martensita tem estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado (TCC), sendo uma distorção da estrutura CCC, onde o carbono é responsável por distorcer a rede cristalina. A martensita se forma em velocidades extremas e rápidas, e em formas alongadas, sejam elas ripas ou placas. Placas nucleadas crescem rapidamente, mais no sentido de alongar-se do que no sentido de aumentar sua espessura. O crescimento é interrompido por algum obstáculo, inicialmente contornos de grão austeníticos e, posteriormente, placas já formadas anteriormente.

Na FIG 3.2 estão presentes uma microestrutura perlítica encontrada em um segmento de trilha analisado em um microscópio óptico.

**Figura 3.2 - Microestrutura perlítica encontrada em um segmento de trilho.**



Fonte: CONAMET, 2001

Trilhos bainíticos e martensíticos também são aplicados em estruturas de rolamento. Trilhos bainíticos possuem baixo teor de carbono, geralmente entre 0,02% e 0,4%, com significativas adições de Manganês, Silício, Cromo, Molibdênio, Níquel e Boro. Com a realização de tratamentos térmicos, geralmente têmpera e revenimento, estes passam a possuir grande tenacidade a fratura e resistência a propagação de defeitos (ROSA, 2008).

Os trilhos martensíticos exibem boa resistência ao impacto e maior capacidade de encruamento com satisfatória resistência à fadiga. Entretanto, os trilhos bainíticos e martensíticos geralmente possuem menor ductilidade do que os trilhos perlíticos (AGLAN, 2004).

### **3.1.3 Pontes Rolantes**

As pontes rolantes são equipamentos capazes de elevar e transladar cargas, sendo constituídas por uma estrutura metálica, apoiada em suas extremidades sob ou sobre vigas de rolamento. No Brasil, a Norma NBR 8400 fixa as diretrizes básicas para o cálculo das partes estruturais e componentes mecânicos dos equipamentos de levantamento e movimentação de cargas, independentemente do grau de complexidade ou

do tipo de serviço do equipamento, determinando:

- a) solicitações e combinações de solicitações a serem consideradas;
- b) condições de resistência dos diversos componentes do equipamento em relação às solicitações consideradas;
- c) condições de estabilidade a serem observadas.

Historicamente, as pontes rolantes têm sua origem de desenvolvimento na indústria portuária e são projetadas, hoje em dia, para atender diversos tipos de aplicações, respeitando a capacidade de peso da carga e os limites de espaço de cada ambiente. Alguns setores industriais são altamente dependentes destas máquinas, como por exemplo, siderurgia, papel e celulose, montagem industrial e indústria metal mecânica (LENZANDRELENZ, 2012).

Para cada tipo de aplicação existe um equipamento ideal pois, os modelos das pontes rolantes atendem necessidades específicas para cada tipo de instalação e de carga. Para especificar um equipamento é preciso conhecer a capacidade e o desempenho necessário na elevação e movimentação de cargas (LENZANDRELENZ, 2012).

Na FIG. 3.3 é apresentada uma ilustração de ponte rolante utilizada em um processo industrial.

**Figura 3.3 - Ponte Rolante utilizada para elevar e transladar cargas**



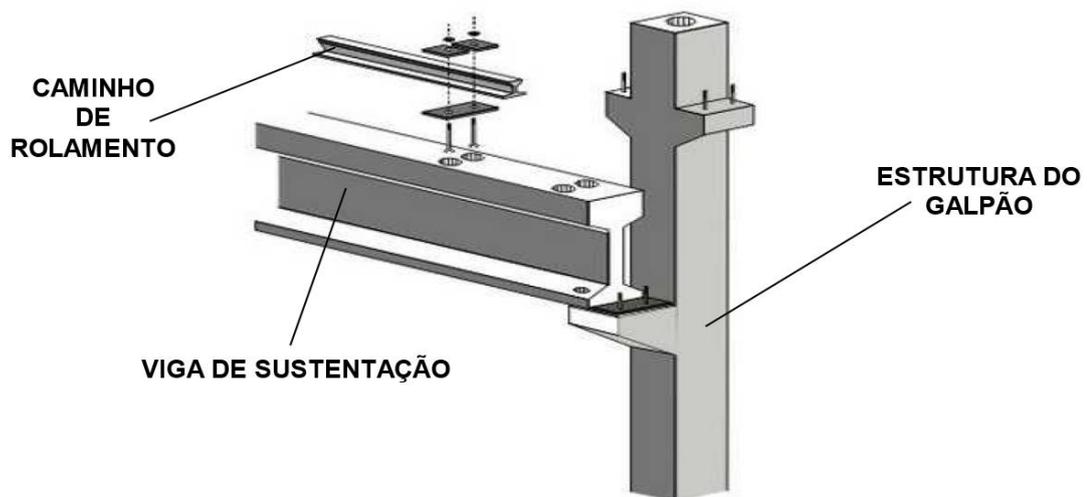
Fonte: demagcranes.com.br

A carga da ponte rolante é movimentada tridimensionalmente, limitada apenas pelo vão do equipamento e pelo caminho de rolamento. Sua operação pode acontecer de forma manual ou automatizada, sendo que, na primeira o operador opera através de um controle ligado diretamente ao equipamento e na segunda o operador opera a ponte remotamente. As cargas erguidas por ponte rolantes podem variar entre uma e quinhentas toneladas.

Basicamente, as pontes rolantes são constituídas pelo caminho de rolamento, vigas de sustentação, cabeceiras e batentes de fim de curso, além de todo aparato elétrico responsável pela operacionalidade do equipamento.

O caminho de rolamento é constituído por um par de trilhos, normalmente fixado na superfície superior de vigas, servindo como caminho para o deslocamento longitudinal da ponte rolante. Montagens inadequadas e fora de tolerâncias especificadas na norma podem ocasionar desgastes rápidos das abas das rodas, aquecimento excessivo e deterioração dos rolamentos, deformações da estrutura metálica, rupturas dos cordões de solda e descarrilamentos. Na FIG. 3.4 é apresentada uma figura esquemática dos componentes de uma ponte rolante.

**Figura 3.4 - Figura esquemática dos componentes de uma ponte rolante.**



Fonte: LENZANDRELENNZ, 2012.

A viga de sustentação trata-se da principal estrutura da ponte rolante. Quando o projeto da ponte rolante utiliza apenas uma viga tem-se uma ponte chamada de univiga, e quando o projeto da ponte rolante utiliza duas vigas tem-se uma ponte chamada de ponte dupla viga.

As cabeceiras estão localizadas nas extremidades da viga e nelas estão fixadas as caixas de rodas, que por sua vez, alojam as rodas de rolamento. Uma das rodas de rolamento, geralmente, é acionada por uma caixa de engrenagem, que por sua vez é tracionada por um motor elétrico, o que permite o movimento longitudinal da ponte rolante. Estas rodas se movem por sobre os trilhos que compõem o caminho de rolamento.

Os batentes constituem um sistema de segurança que possui vários estágios, com a finalidade de prevenir choques entre as partes da estrutura de movimentação, ou entre essa e a carga, ou ainda, entre a carga e qualquer objeto que se encontre na direção do seu deslocamento.

## **3.2 SOLDAGEM**

### **3.2.1 Definição**

A soldagem é amplamente empregada na união de componentes de estruturas metálicas e de equipamentos para as finalidades mais diversificadas. As grandes vantagens da soldagem sobre os demais processos de união consistem em sua simplicidade e economia, uma vez que, a execução das soldas requer quantidades relativamente pequenas de material (OKUMURA, 1982).

Em muitas aplicações, a soldagem pode complementar ou competir com outros processos de união (união mecânica, colagem) e de fabricação (fundição, conformação mecânica, usinagem), sendo importante para o sucesso, a correta escolha e aplicação dos processos de soldagem (MODENESI, 2011).

Os processos de soldagem de metais devem, na medida do possível, atender aos seguintes requisitos:

- Gerar energia suficiente para a união dos materiais;
- Remover as contaminações das superfícies a serem unidas;
- Evitar a contaminação da região da solda pela atmosfera;
- Controlar os aspectos metalúrgicos da solda.

A principal fonte de calor utilizada nas operações de soldagem por fusão de materiais metálicos é o arco elétrico. Esta fonte de calor consiste de uma descarga elétrica, sustentada através de um gás ionizado, a alta temperatura, conhecido como plasma. Através de sua utilização, é possível a obtenção de uma energia concentrada para a fusão localizada do material metálico (JÚNIOR, 2013).

#### **3.2.4 Metal de solda e zona termicamente afetada (ZTA)**

Zona termicamente afetada é a região do metal de base aquecida durante a soldagem a temperaturas capazes de causarem mudanças na microestrutura e propriedades do material. Tende a ser a região mais crítica de uma junta soldada (OKUMURA, 1982).

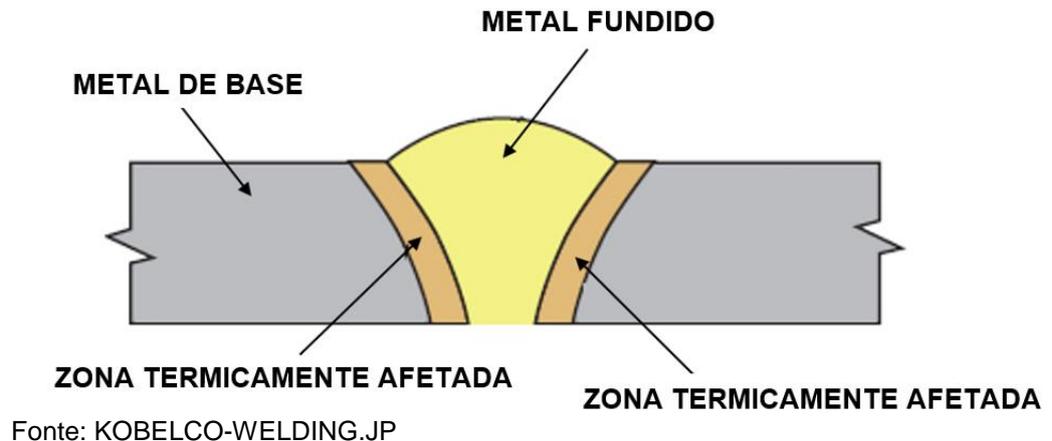
A microestrutura da zona termicamente afetada resulta das transformações estruturais do metal de base, associadas com os ciclos térmicos e deformações durante a soldagem. (MODENESI, 2005).

A ZTA dos aços transformáveis é formada pelas regiões apresentadas, a partir do cordão de solda:

- a) Região de granulação grosseira
- b) Região de granulação fina
- c) Região intercrítica
- d) Região subcrítica

As regiões de uma junta soldada estão representadas na FIG. 3.5.

**Figura 3.5 - Representação da zona termicamente afetada**



### **3.2.5 Fluxo de calor, aporte térmico e ciclo térmico de soldagem**

A soldagem por fusão é caracterizada pelo aquecimento de regiões localizadas das peças, permanecendo o restante destas em temperaturas muito inferiores. As regiões aquecidas tendem a se dilatar, mas esta dilatação é dificultada pelas partes adjacentes submetidas a temperaturas menores, o que resulta no desenvolvimento de deformações elásticas e plásticas no material aquecido (ANDREWS, 1972)

Ao final do processo de soldagem, tensões residuais e distorções ocorrem na peça (MODENESI, 2001).

A energia utilizada nos processos de soldagem provoca alterações nos metais de base e de solda, sendo que, esta energia influencia os seguintes aspectos da junta soldada (MACHADO, 2000):

- a) Macroestrutura de solidificação do metal de solda;
- b) Transformações microestruturais;
- c) Propriedades mecânicas;
- d) Propriedades metalúrgicas;
- e) Descontinuidades;
- f) Tensões residuais;
- g) Deformações.

O fluxo de calor na soldagem pode ser dividido, de maneira simplificada, em duas etapas básicas: fornecimento de calor a junta e dissipação deste calor pela peça (ANDREWS, 1972).

Na primeira etapa, para soldagem a arco, pode-se considerar o arco como uma única fonte de calor, definido por sua energia de soldagem, também conhecido como aporte térmico ou ainda heat input, representada através da Eq. 3.1:

$$E = \frac{\eta \times V \times I}{v} \quad (3.1)$$

E = Energia de soldagem;

$\eta$  = Eficiência térmica do processo;

V = Tensão no arco elétrico em volts;

I = Corrente de soldagem em ampères;

v = Velocidade de soldagem em mm/s.

Na segunda etapa, a dissipação do calor ocorre principalmente por condução na peça, das regiões aquecidas para o restante do material. A evolução de temperatura em diferentes pontos, devido à soldagem, pode ser estimada teórica ou experimentalmente.

Um ponto localizado próximo à junta soldada experimenta uma variação de temperatura devido à passagem da fonte de calor. A curva do histórico térmico deste ponto é denominada por ciclo térmico (BRACARENSE, 1997).

O comportamento das curvas representativas de ciclos térmicos reflete aspectos importantes a respeito das condições utilizadas na soldagem. Geralmente, fatores como o tipo de processo utilizado, realização ou não de pré-aquecimento e/ou pós-aquecimento e energia de soldagem, são capazes de estabelecer diferenças na curva do ciclo térmico de soldagem (RODRIGUES, 2010).

A curva de ciclo térmico apresenta as seguintes variáveis:

- a) Temperatura de pico ( $T_p$ ), que é a temperatura máxima atingida no ponto. A temperatura de pico diminui com a distância ao centro da solda e indica a extensão das regiões afetadas pelo calor de soldagem;
- b) Temperatura crítica ( $T_c$ ), que é a temperatura mínima para ocorrer uma alteração relevante como uma transformação de fase;
- c) Tempo de permanência acima de uma temperatura crítica ( $t_p$ ), que é o tempo em que o ponto fica submetido a temperaturas superiores a uma temperatura crítica;
- d) Velocidade de resfriamento ( $\phi$ ): Este parâmetro é importante na determinação da microestrutura em materiais como os aços estruturais comuns, que podem sofrer transformações de fase durante o resfriamento. Em uma dada temperatura, a velocidade de resfriamento é dada pela inclinação da curva de ciclo térmico nesta temperatura.

A velocidade de resfriamento ao longo do eixo da solda (para  $y$  e  $z$  nulos) para uma fonte de calor pontual na superfície de uma chapa grossa é dada pela Eq. 3.2:

$$\phi_g = \frac{2 \pi k(T - T_0)^2}{H_L} \quad (3.2)$$

$\phi_g$  = Velocidade de soldagem em uma chapa grossa

$k$  = Condutividade térmica do material em  $\frac{J}{cm.s^\circ C}$

$T$  = Temperatura na qual estima-se a velocidade de resfriamento  $^\circ C$

$T_0$  = Temperatura inicial da chapa  $^\circ C$

Para chapas finas com penetração total e fluxo de calor bidimensional tem-se a Eq. 3.3:

$$\phi_f = 2\pi k\rho C \left(\frac{h}{H_L}\right)^2 (T - T_0)^3 \quad (3.3)$$

$\phi_f$  = Velocidade de soldagem em uma chapa fina

$k$  = Condutividade térmica do material em  $\frac{J}{cm \cdot s \cdot ^\circ C}$

$\rho$  = Densidade do material em  $\frac{g}{cm^3}$

$C$  = Calor específico do material em  $\frac{J}{g \cdot ^\circ C}$

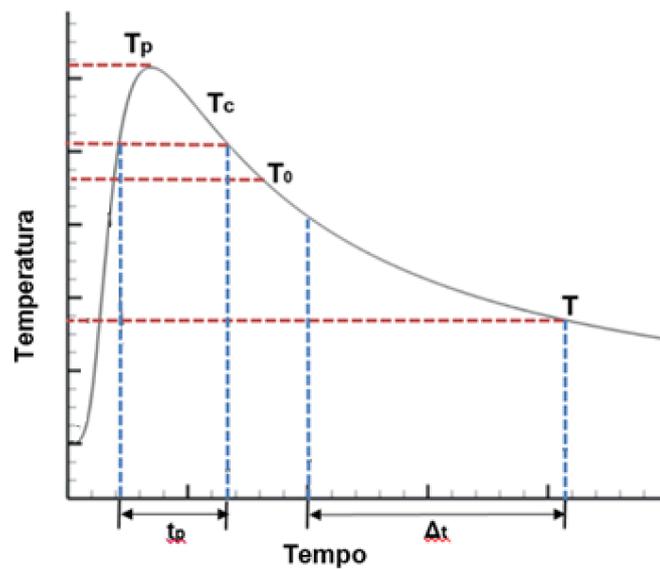
$h$  = Espessura da chapa em  $mm$

$T$  = Temperatura na qual estima-se a velocidade de resfriamento  $^\circ C$

$T_0$  = Temperatura inicial da chapa  $^\circ C$

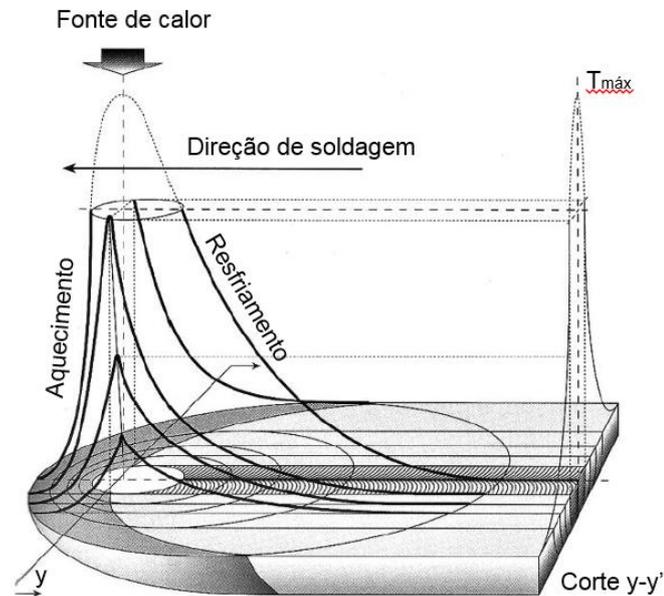
Nas FIGs. 3.6 e 3.7, estão representadas curvas de ciclo térmico de soldagem.

**Figura 3.6 - Ciclo Térmico de uma junta soldada**



Fonte: ZAMIN, 2010

**Figura 3.7 - Representação dos ciclos térmicos em várias posições de uma junta soldada**



Fonte: COLPAERT, 2008.

### 3.2.7 Defeitos nos processos de soldagem

Designa-se como defeitos ou descontinuidade a qualquer interrupção da estrutura típica de uma junta soldada. Pode-se considerar como descontinuidade, a falta de homogeneidade de características físicas, mecânicas ou metalúrgicas do material ou da solda. A existência de descontinuidades em uma junta não significa necessariamente que a mesma seja defeituosa. Esta condição depende da aplicação a que se destina o componente e é em geral caracterizado pela comparação das descontinuidades observadas ou propriedade medida com níveis estabelecidos em um código ou projeto. Assim, considera-se uma junta soldada que contém defeitos quando esta apresenta descontinuidades ou propriedades que não atendam ao exigido pelas normas vigentes (MODENESI, 2001).

As descontinuidades dividem-se em dois tipos (QUITES, 1995):

- Dimensionais;
- Estruturais.

As discontinuidades dimensionais são irregularidades ou inconformidades nas dimensões ou na forma dos cordões de solda. A gravidade varia com a aplicação ou o processamento que a peça soldada será submetida posteriormente. Haja visto que, para a fabricação de uma estrutura soldada, é necessário que tanto a estrutura como as suas soldas tenham dimensões e formas similares (dentro das tolerâncias exigidas) às indicadas em projetos ou desenhos (QUITES, 1995). As principais discontinuidades dimensionais são:

- a) Distorção
- b) Preparação da junta incorreta
- c) Dimensão incorreta da solda

As discontinuidades estruturais são defeitos na macroestrutura ou microestrutura da região soldada, associadas à falta de material ou à presença de material estranho em quantidades apreciáveis (QUITES, 1995).

As principais discontinuidades estruturais são:

- a) Falta de fusão
- b) Falta de penetração
- c) Respingos
- d) Mordeduras
- e) Trincas
- f) Inclusão de escória
- g) Inclusão metálica
- h) Porosidade

### 3.3 PROCESSO DE SOLDAGEM ALUMINOTÉRMICO – TW

#### 3.3.1 Características do processo de soldagem TW

O processo de soldagem aluminotérmico (Thermit Welding – TW) não possui relação com outros processos de soldagem conhecidos, como por exemplo, o processo de soldagem por eletrodo revestido. O processo de soldagem aluminotérmico (Thermit Welding – TW), possui aplicação específica onde, geralmente, outros processos não apresentam flexibilidade necessária para a sua realização em campo. Devido à sua relativa simplicidade e independência de fontes externas de energia, a aluminotermia consagrou-se como um dos métodos mais empregados na soldagem de trilhos (ROSA, 2008).

Thermit é uma mistura composta de alumínio e óxido de ferro, finamente dividido. Elementos de liga tais como manganês, carbono, molibdênio, níquel, vanádio, cromo e titânio, podem ser adicionados com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas da solda (BALCHIN, 2002).

Seu surgimento ocorreu no final do século dezanove, com a denominação "Thermit" (às vezes dita "Thermite") pela empresa Goldschmidt AG (West Germany). O químico Hans Goldschmidt descobriu que a reação exotérmica entre o pó de alumínio e um óxido metálico pode ser iniciada por uma fonte externa de calor. Por ser altamente exotérmica, esta reação pode ser autossustentada, com ou sem pressão. Para aplicações em soldagem, o metal de enchimento é obtido do metal líquido, formada na reação química. (O'BRIEN,1991)

O processo da reação TW tem como base o fato do alumínio extrair oxigênio de óxidos de outros metais para formar óxido de alumínio e liberar grande quantidade de calor, que poderá então, ser aproveitado na soldagem de peças de ferro e aço de vários tamanhos. Por exemplo, a reação do alumínio com óxido de ferro, produz óxido de alumínio e ferro líquidos, com temperatura de 3000°C. (SHERIDAN, 1996).

A reação exotérmica, existente no processo TW, requer cerca de 20 a 30 segundos para se efetivar, independentemente da quantidade de produtos químicos envolvidos. Esta reação, que envolve ferro com óxido de alumínio, pode ser representada pela Eq. 3.5:



Para produzir uma solda aceitável, é necessário o controle preciso da composição da carga e do intervalo de ignição da mistura do fundente. Além destes fatores, a produção de uma satisfatória solda envolve também a mecânica de corte adequada do trilho e da superfície preparação, além do alinhamento, da colocação de moldes e o pré-aquecimento adequado. Contudo, mesmo realizando uma solda seguindo todos os procedimentos recomendados, e esta estando ainda livre de defeitos, suas propriedades mecânicas são geralmente inferiores aos da calha principal. (SCHROEDER, 1984)

A resistência à tração de um trilho ferroviário é de aproximadamente 910 Mpa. O mesmo possui um alongamento médio de 11 % e uma redução de área de 14 %. Por comparação, os valores típicos para soldas Thermit são: resistência a tração de 790 Mpa e alongamento de apenas 1% a 3% (MYERS, 1982).

### **3.3.2 Consumíveis e equipamentos para soldagem TW**

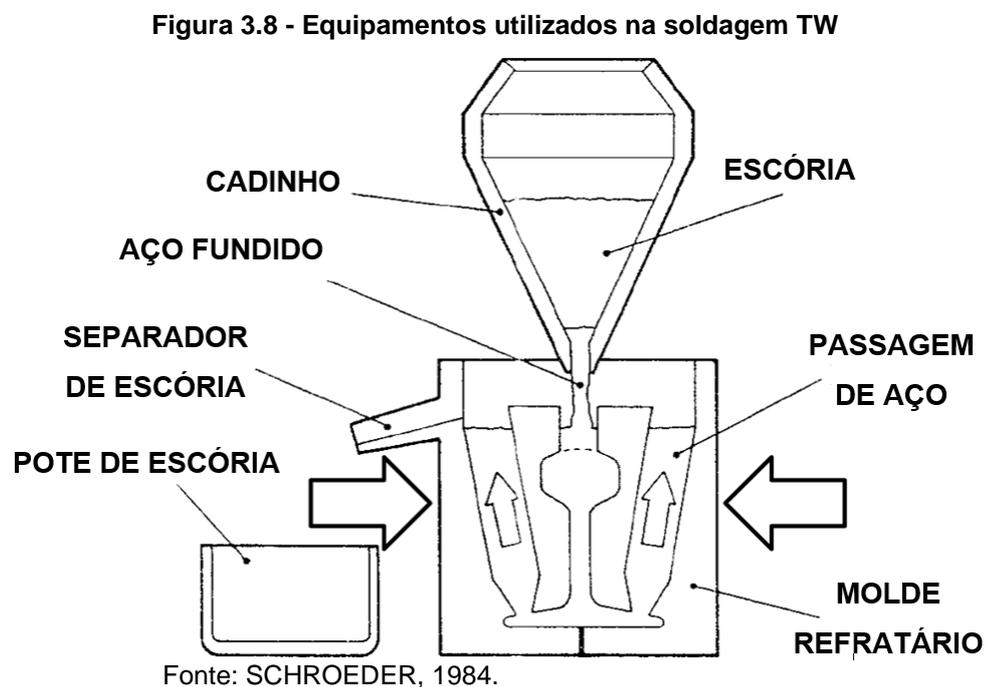
O consumível utilizado neste processo é encontrado na forma de pó, que contém todos os elementos responsáveis pela reação aluminotérmica. A mistura é composta de aproximadamente 25 % de alumínio e o restante de magnetita e ferro-liga, que produzem, após a combustão, aproximadamente 70 % de aço líquido. Este aço representa aproximadamente a metade da mistura original, em peso, e um terço em volume.

A quantidade de ligas contidas na mistura determina a temperatura da reação que deve ser menor que 2500° C para evitar sublimação do alumínio e, maior do que

2040°C para proporcionar uma separação adequada entre a escória e a mistura fundida. Contudo, a reação aluminotérmica não é espontânea, requerendo uma ignição inicial, geralmente através de um acendedor especial.

Os equipamentos utilizados para realização do processo soldagem TW, são basicamente: cadinho, moldes e sistema de pré-aquecimento.

A FIG 3.8 representa um esquema de montagem do processo TW.



### 3.3.3 Parâmetros operacionais da soldagem TW

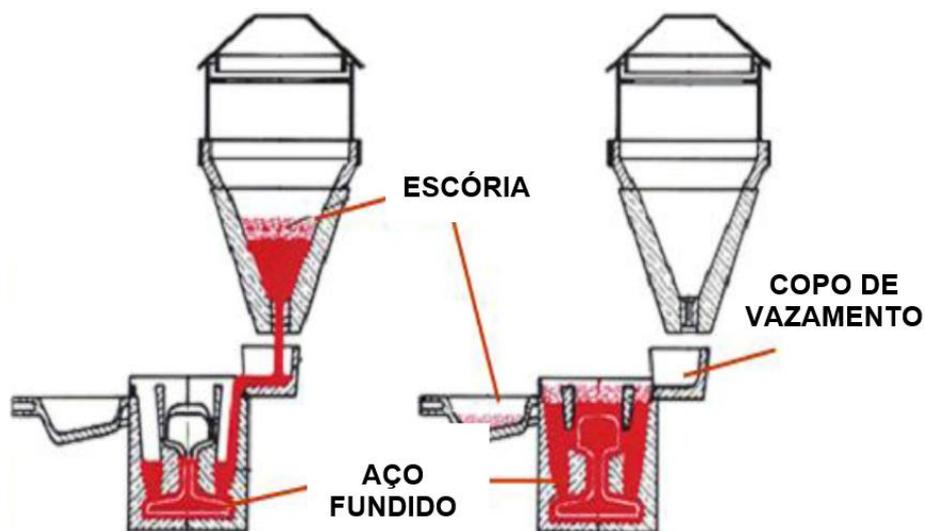
Dentro do processo TW para soldagem de trilhos, são empregados atualmente três métodos tecnologicamente equivalentes com variantes nos procedimentos de pré-aquecimento e forma de vazamento, cuja diferença principal consiste no modo de conduzir o calor às extremidades dos trilhos. Esses métodos são conhecidos por: SmW-F, SoWoS e SkV-F (BRACARENSE, 2000).

O método SmW-F, também conhecido como processo de soldagem com curva chata, é caracterizado por seu tempo de pré-aquecimento, onde as pontas dos trilhos são

envolvidas com moldes pré-fabricados e pré-aquecidos por uma fonte de calor até uma temperatura de aproximadamente 1000 °C posicionada acima desses. Dependendo do perfil do trilho a ser soldado o tempo de pré-aquecimento pode variar de quatro a oito minutos.

Devido a geometria do molde SmW-F, o aço é conduzido indiretamente às seções que serão soldadas, sendo despejado inicialmente no copo de vazamento e preenchendo o molde, com o primeiro contato aos trilhos pelo Patim. A representação esquemática do processo SmW-F está mostrada na FIG 3.9.

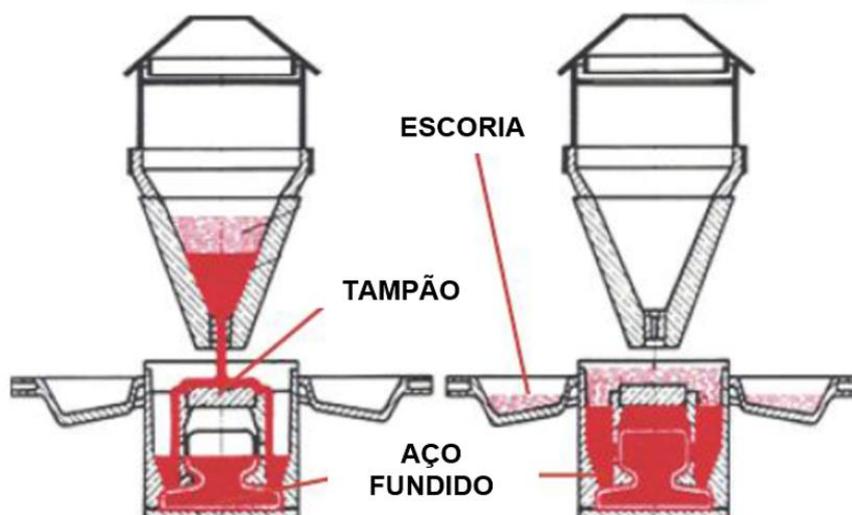
**Figura 3.9 - Representação esquemática do método SmW-F**



Fonte: SARTORI, 2010

➤ O método SoWoS é similar ao método descrito anteriormente, apresentando a diferença apenas no modo como é efetuado o vazamento. Atualmente, o método SoWos é o mais utilizado dentre os três, sendo utilizado inclusive, neste trabalho. Nesse método, as pontas dos trilhos também são envolvidas pelo molde refratário, e realiza-se o pré-aquecimento até a temperatura aproximada de 1000 °C. O tempo de pré-aquecimento varia entre quatro a dez minutos. Este método requer um espaçamento entre os trilhos de vinte a vinte e seis milímetros, dependendo do perfil do trilho a ser soldado. A representação esquemática do processo SoWos está mostrada na FIG 3.10.

Figura 3.10 - Representação esquemática do método SoWos



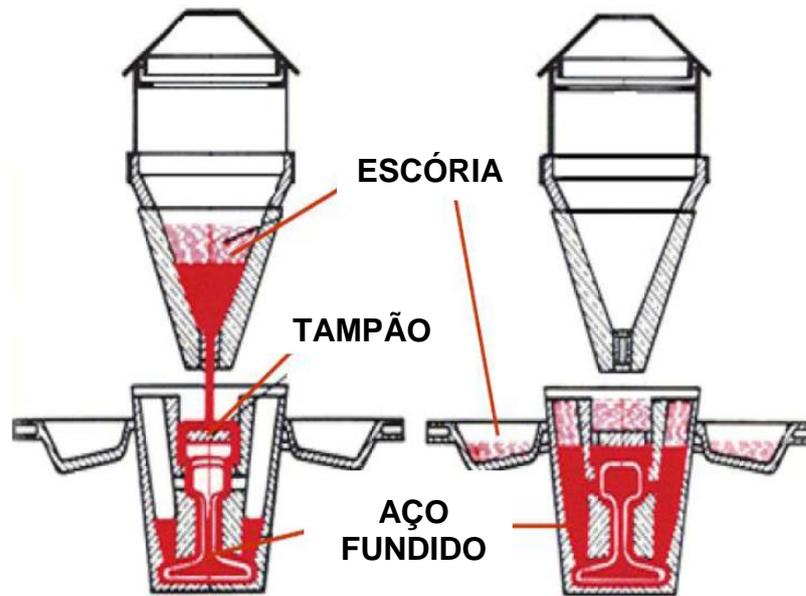
Fonte: SARTORI, 2010

Com a modernização, cada vez mais intensa, transformou-se a utilização de rodovias e pontes rolantes, e assim surgia a necessidade de métodos de soldagem que requeressem intervalos de tempo cada vez menores para a execução de reparos nos trilhos. (BRACARENSE, 2000)

➤ O método SkV-F surgiu na Alemanha, entre 1963 e 1964. Foram efetuadas séries experimentais de 1000 soldagens utilizando este método, que não possuía pré-aquecimento, com a finalidade de otimizar o tempo. Constataram, em laboratório, que este método apresentava ótimos resultados, correspondendo plenamente às expectativas, porém, em clima úmido os resultados eram adversos. Foram observados que os melhores resultados eram alcançados, sem a dependência do clima, quando uma rápida secagem do topo dos trilhos era efetuada. (SARTORI, 2010).

Utilizando-se neste processo um pré-aquecimento durante um intervalo de um minuto, através de um maçarico especial, consegue-se impedir a ocorrência de oscilações nos resultados da execução das soldas. Dessa forma, criou-se um novo método denominado processo de soldagem rápida com pré-aquecimento curto ou SKv-F. A representação esquemática do processo SKv-F está mostrada na FIG 3.11.

Figura 3.11 - Representação esquemática do método SKv-F



Fonte: SARTORI, 2010

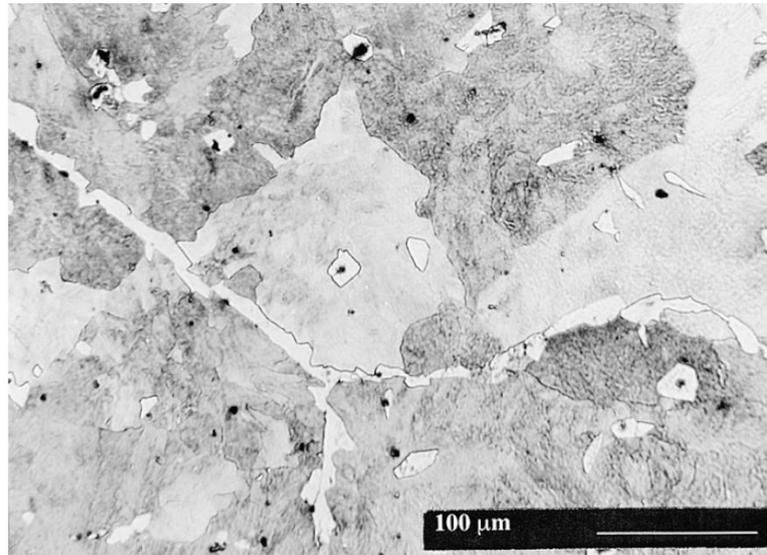
### 3.3.4 Propriedades mecânicas e metalúrgicas da solda TW

A estrutura do metal fundido, invariavelmente, apresenta propriedades mecânicas inferiores às do trilho (metal de base). A estrutura metalúrgica presente na solda aluminotérmica depende de alguns fatores como, composição química da mistura, da composição química dos trilhos e das taxas de resfriamento impostas ao processo (ROSA, 2008).

A microestrutura indicada para a solda é a perlítica, embora sejam permitidas mínimas percentagens de ferrita. Morfologias em forma de agulha nesta fase são indesejadas por possuírem baixa ductilidade. Fases martensíticas, bainíticas e estruturas dendríticas também não são recomendadas, pois conferem baixa tenacidade a junta soldada (MYERS, 1982).

A FIG. 3.12 apresenta uma metalografia de uma junta soldada com o processo TW sem tratamento térmico proveniente de um microscópio óptico com aumento de 50 vezes. Pode ser observada a presença de perlita e ferrita proeutetóide.

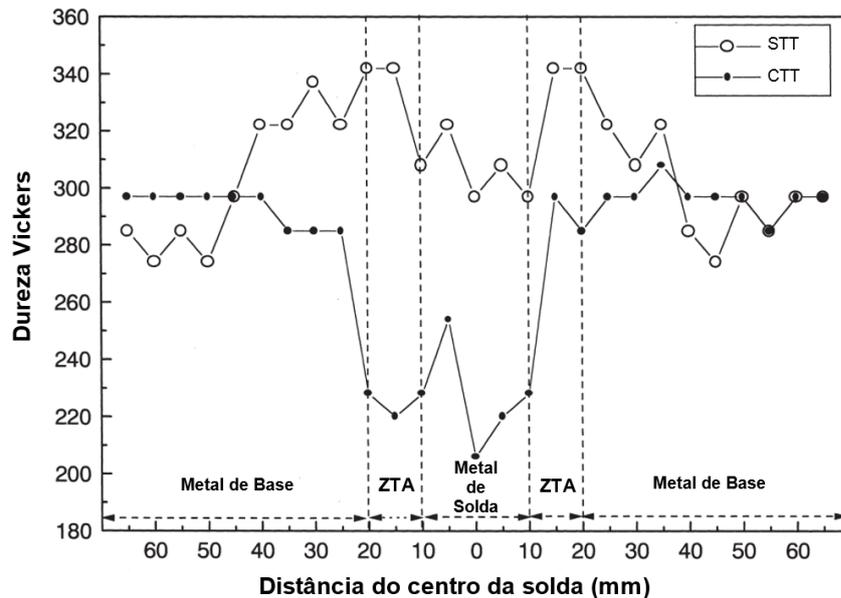
**Figura 3.12 - Microestrutura de uma junta soldada utilizando processo de soldagem TW sem tratamento térmico**



Fonte: JOVANOVIC, 1999.

O perfil de dureza do trilho soldado geralmente apresenta homogeneidade, possuindo dureza mínima no centro da solda e dureza máxima na região da zona termicamente afetada. As variações de dureza ao longo da solda são ser observadas na FIG. 3.13.

**Figura 3.13 – Perfil de dureza transversal ao longo do perfil soldado**



STT – Sem tratamento térmico

CTT – Com tratamento térmico

Fonte: JOVANOVIC, 1999.

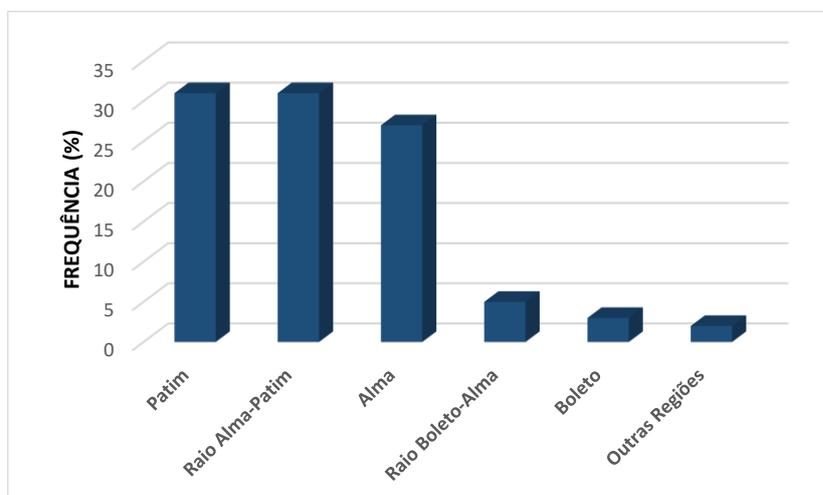
### 3.3.5 Defeitos na soldagem TW

Como em todo processo de soldagem, um procedimento de união mal executado pode acarretar em consequências indesejáveis, como uma falha prematura. Na grande maioria dos casos, esta falha origina-se na ZTA, devido a fragilidade desta região ocasionada pelo aumento da dureza em decorrência da grande influência da velocidade de resfriamento. Os defeitos ocasionados no processo TW são classificados pelo International Institute of Welding (IIW) em função da sua natureza, forma e dimensões. Os principais defeitos responsáveis por falhas no processo TW são:

- Inclusão de areia
- Queima de esmerilhamento
- Grãos colunares no bolete
- Falta de fusão
- Hot pull-apart
- Porosidade
- Contração na solidificação
- Inclusão de escória
- Gota fria

A FIG. 3.14 a seguir apresenta as regiões do trilha mais suscetíveis a falhas, segundo (LAWRENCE, 2004).

**Figura 3.14 - Regiões da solda TW mais suscetíveis a falhas**



Fonte: LAWRENCE, 2004

### 3.4 PROCESSO DE SOLDAGEM ELETRODO REVESTIDO – SMAW

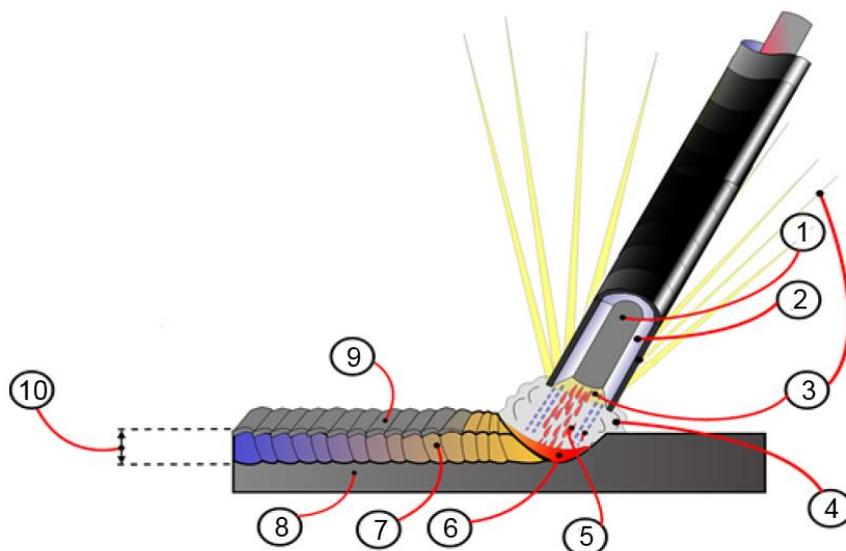
#### 3.4.1 Características do processo de soldagem SMAW

A soldagem a arco com eletrodos revestidos (Shielded Metal Arc Welding - SMAW) é um processo que produz a coalescência entre metais pelo aquecimento destes com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico revestido e a peça que está sendo soldada. (MODENESI, 2005).

A busca contínua do aumento da produtividade propiciou o desenvolvimento de novos processos de soldagem. No entanto, ainda nos dias de hoje, o processo de soldagem SMAW é largamente empregado graças à sua grande versatilidade, aliados ao baixo custo de operação, à simplicidade dos equipamentos necessários e à possibilidade de uso em locais de difícil acesso ou sujeitos a ventos (OKUMURA, 1982).

O eletrodo revestido consiste de uma vareta metálica, chamada “alma”, trefilada ou fundida, que conduz a corrente elétrica e fornece metal de adição para enchimento da junta. A alma é recoberta por uma mistura de diferentes materiais, numa camada que forma o “revestimento” do eletrodo. (MODENESI, 2005). Na FIG. 3.15, o processo de soldagem SMAW está apresentado.

Figura 3.15 - Desenho esquemático do processo SMAW



- 1) Alma
- 2) Revestimento
- 3) Arco elétrico
- 4) Atmosfera protetora
- 5) Metal de adição
- 6) Poça de fusão
- 7) Cordão de solda
- 8) Metal de base
- 9) Escória
- 10) Penetração

Fonte: pt.slideshare.net

O modo através do qual se processa a transferência do metal em fusão inclui decisivamente na qualidade da junta soldada. O modo de transferência é função da corrente de soldagem, da composição do revestimento e do ponto de fusão do eletrodo (OKUMURA,1982).

O processo SMAW muitas vezes é aplicado na soldagem de trilhos devido a sua grande versatilidade, conforme apresentado anteriormente. Geralmente, a solda é realizada em locais de difícil acesso e em condições adversas, como por exemplo, em recuperação de trilhos de pontes rolantes fixados em estruturas de rolamento a cem metros de altura dentro de galpões fechados. A atmosfera destes locais pode conter ainda particulados provenientes de processo de transformação do aço, o que dificulta a limpeza das partes a serem soldadas, podendo culminar em defeitos nas soldas, caso não haja controle na execução da soldagem.

### **3.4.2 Consumíveis e equipamentos de soldagem SMAW**

O eletrodo revestido tem como função principal servir como material de deposição nos processos de soldagem a arco, tendo forma de uma vareta metálica. Este é caracterizado por sua estrutura com um núcleo metálico, um revestimento e uma extremidade não revestida. O revestimento possui composições distintas que irão gerar gases que atuarão como proteção do cordão de solda contra o ar atmosférico,

além de conter elementos de liga que promoverão o ajuste da composição química do metal de solda (SECCO, 2002).

Dentre as principais funções do revestimento, destacam-se:

- Estabilização do arco elétrico;
- Ajuste da composição química do cordão, pela adição de elementos de liga e eliminação de impurezas;
- Proteção da poça de fusão e o metal de solda contra a contaminação pela atmosfera;
- Conferência de características operacionais, mecânicas e metalúrgicas

Em função dos componentes do revestimento, os eletrodos podem ser do tipo ácido, celulósico, rútilico e básico. A possibilidade de inúmeras formulações para o revestimento explica a principal característica deste processo, que é sua grande versatilidade em termos de ligas soldáveis, características operacionais, características mecânicas e características metalúrgicas do metal depositado (MODENESI, 2005).

- O revestimento ácido é constituído por óxido de ferro somado a elementos escorificantes a base de sílica, podendo conter também pó de ferro, o que ocasiona o aumento do rendimento.
- O revestimento celulósico é constituído de aproximadamente 30 % de matéria orgânica, sobretudo celulose. O cordão gerado possui alta penetração, o que facilita sua utilização em oleodutos e gasodutos. Possui alta quantidade de hidrogênio, o que limita algumas utilizações.
- O revestimento rútilico é constituído principalmente por dióxido de titânio, conhecido como rutilo. A presença do rutilo facilita a abertura e a estabilização do arco elétrico. Este revestimento proporciona baixa penetração do cordão de solda, o que facilita a soldagem de juntas com grande abertura de raiz.

➤ O revestimento básico é constituído por carbonato de cálcio e fluorita. Possui baixa quantidade de hidrogênio, além de elementos desoxidantes e dessulfurantes, que proporcionam a diminuição da quantidade de impurezas na solda.

Um eletrodo ideal seria aquele que cumprisse plenamente todas as funções, a um custo de produção satisfatório, e ainda não apresentasse problemas de conservação e manuseio. Obviamente, tal eletrodo não existe e os eletrodos comerciais procuram atender mais completamente a um conjunto de exigências, em detrimento de outras, de modo a torná-los adequados a determinadas aplicações, a um custo razoável (JEFFUS, 2012).

Para racionalizar o mercado, os eletrodos revestidos são classificados de acordo com sistemas propostos por diferentes sociedades, como por exemplo AWS. A classificação mais utilizada para eletrodos revestidos no Brasil é proposta pelas especificações que estão listadas na TAB. 3.2.

**Tabela 3.2 – Especificação AWS para classificação de eletrodos revestidos**

<b>Especificação</b>	<b>Tipo de eletrodo</b>
AWS A 5.1	Eletrodo revestido para aços ao carbono
AWS A 5.3	Eletrodo revestido para alumínio e suas ligas
AWS A 5.4	Eletrodo revestido para aços inoxidáveis
AWS A 5.5	Eletrodo revestido para aços de baixa liga
AWS A 5.6	Eletrodo revestido para cobre e suas ligas
AWS A 5.11	Eletrodo revestido para níquel e suas ligas
AWS A 5.13	Eletrodo revestido para soldagem a arco
AWS A 5.15	Eletrodo revestido para ferro fundido

Fonte: Norma AWS

Muitos fatores devem ser considerados quando se seleciona o eletrodo adequado para uma determinada aplicação. Alguns itens a serem considerados são:

- Tipo do metal de base;
- Posição de soldagem;
- Espessura da chapa.

Os equipamentos para soldagem utilizando eletrodo revestido compreendem, em geral, a fonte de energia, cabos, porta eletrodos, ferramentas (picadeira e escova de aço), além de equipamentos de proteção individual.

O fornecimento de energia para o processo pode ser por corrente alternada (transformadores) ou por corrente contínua (geradores ou retificadores). Uma maior corrente de soldagem aumenta a taxa de fusão do eletrodo, o volume da poça de fusão, a penetração e a largura do cordão. O tipo de corrente e a sua polaridade afetam a forma e as dimensões da poça de fusão, a estabilidade do arco e o modo de transferência de metal de adição. (ROSA, 2008).

### 3.4.3 Parâmetros operacionais da soldagem SMAW

Na soldagem SMAW, as principais variáveis operatórias são: diâmetro do eletrodo, tipo de revestimento, polaridade, intensidade e tipo de corrente de soldagem, tensão, comprimento do arco, velocidade de soldagem, técnica de manipulação do eletrodo e sequência de deposição (OKUMURA, 1982). Na TAB 3.3 estão apresentados dados sobre parâmetros elétricos para diferentes eletrodos.

**Tabela 3.3 – Faixas típicas de parâmetros elétricos de operação para diferentes eletrodos**

Dados do eletrodo		Parâmetros elétricos	
Diâmetro (mm)	Seção (mm <sup>2</sup> )	Tensão (V)	Corrente média (A)
1,5	1,77	20	40 ± 10
2,0	3,14	22	65 ± 15
2,5	4,91	23	80 ± 30
3,25	8,30	24	130 ± 50
4,0	12,57	26	170 ± 60
5,0	19,64	28	200 ± 80
6,0	28,27	30	300 ± 90

Fonte: [www.servsolda.com.br](http://www.servsolda.com.br)

A corrente é uma das variáveis de soldagem que apresenta maior influência na operação e no resultado do processo SMAW. A polaridade influencia na forma e na dimensão da poça de fusão, além de afetar o tipo de transferência e a estabilidade do

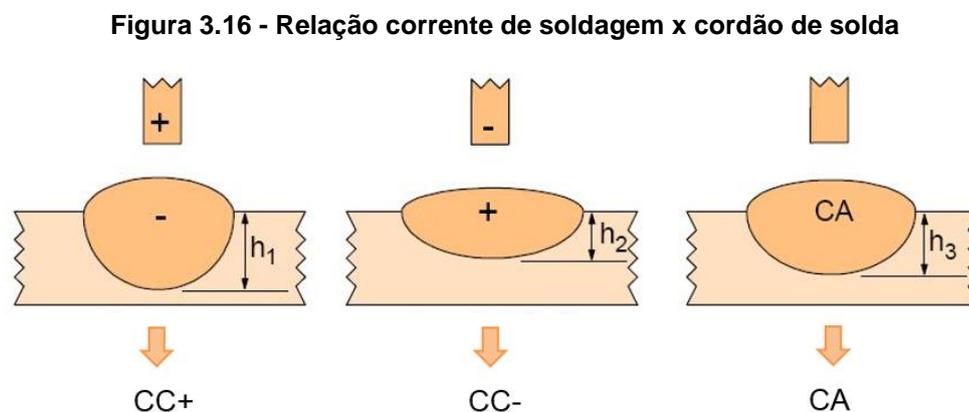
arco elétrico. A corrente pode ser fornecida de forma contínua, apresentando diferentes tipos de polaridade (direta e inversa) ou de forma alternada.

A corrente contínua com polaridade direta (CC-), o eletrodo possui polo negativo e a base polo positivo. Diante disso, o fluxo de elétrons vai em direção a peça e o processo apresenta maior taxa de fusão aliada a menor penetração.

A corrente contínua com polaridade inversa (CC+), o eletrodo possui polo positivo e a base polo negativo, possuindo fluxo de elétrons saindo da peça em direção ao eletrodo e o processo apresenta menor taxa de fusão aliada a maior penetração.

Na corrente alternada, a polaridade alterna a cada inversão. Com esta configuração, a geometria do cordão, penetração e a taxa de fusão são intermediárias.

A FIG. 3.16 apresenta as relações entre a corrente de soldagem e os cordões de solda.



O diâmetro do eletrodo, o tipo e a espessura do revestimento indicam a faixa de corrente ideal para sua utilização (OKUMURA,1982).

A velocidade soldagem é um parâmetro que apresenta grande influência na geometria do cordão de solda. Quando excessivamente elevada, torna o cordão convexo com

bordas irregulares e diminui a penetração. Se a velocidade for muito baixa, pode haver inclusão de escoria e cordão se torna irregular (MACHADO, 1996).

#### **3.4.4 Propriedades mecânicas e metalúrgicas da solda SMAW**

Seria ideal se o metal de solda propriamente dito e a zona afetada pelo calor tivessem exatamente as mesmas propriedades mecânicas e características metalúrgicas que as do metal de base. Entretanto, isso não é possível devido a inúmeras alterações causadas pelo grande aumento pontual de temperatura em decorrência do arco elétrico, que muitas vezes, fragiliza regiões do metal de base e da junta soldada (LINNERT, 1990).

Na soldagem através do processo SMAW, as propriedades da junta soldada são influenciadas pela composição química da alma e do revestimento do eletrodo, além dos parâmetros de soldagem. Conforme discutido no capítulo que apresenta as características do processo de soldagem TW, a microestrutura indicada para a junta soldada através do processo SMAW é a perlítica e o perfil de dureza do trilho soldado geralmente apresenta falta de simetria, características similares as apresentadas no processo TW.

#### **3.4.5 Defeitos na soldagem SMAW**

Os defeitos de soldagem no processo SMAW são por fatores como armazenamento equivocado de eletrodos, técnica incorreta de soldagem, impurezas no metal de base, má preparação da junta, parâmetros inadequados. Os principais defeitos responsáveis por falhas no processo SMAW são:

- Porosidade
- Mordeduras
- Falta de penetração
- Inclusão de escória
- Trincas no cordão de solda
- Trincas no metal de base

Para que a porosidade seja evitada, cuidados com a limpeza da peça, corrente de soldagem e excesso de umidade devem ser tomados. O resfriamento acelerado também pode ser um causador de porosidade na soldagem SMAW. As mordeduras geralmente são causadas pela alta velocidade de soldagem, umidade no eletrodo, sopro magnético e comprimento excessivo do arco. A falta de penetração também pode ser causada por velocidade excessiva de soldagem, além de baixa corrente aplicada e posição de soldagem inadequada.

As trincas podem ser causadas por uma infinidade de fatores. Dentre os principais podemos citar a contaminação por hidrogênio, baixa ductilidade do metal de base, tensões residuais e falta de pré e pós aquecimento, entre outros.

Precauções devem ser tomadas na armazenagem dos eletrodos revestidos para soldagem SMAW. Um eletrodo úmido poderá causar inúmeros defeitos na solda, dentre eles porosidade no início ou mesmo em todo o cordão de solda, trincas ao lado e sob o cordão, porosidade vermiforme, arco instável, respingos abundantes e acabamento ruim (FORTES, 2005)

#### **3.4.6 Eletrodo revestido E 9018D1**

O eletrodo E9018D1 segue a classificação AWS A5.5 (eletrodo para soldagem de baixa liga). É um consumível básico, recomendado para a soldagem de diversos tipos de aços, especialmente os ligados ao manganês e ao molibdênio. São aplicados em soldagem de grande responsabilidade, especialmente tubulações de óleo e plataformas petrolíferas, vasos de pressão, recipientes e tubulações e trilhos. É um eletrodo destinado a restauração e enchimentos protetores ao desgaste, possui fácil remoção de escoria, alto rendimento do metal depositado e excelente tenacidade ao impacto.

As TABs 3.4 e 3.5 apresentam parâmetros de soldagem e propriedades mecânicas para o eletrodo revestido E 9018D1 da norma AWS A5.5.

Tabela 3.4 – Parâmetros de soldagem eletrodo revestido E 9018D1

<b>Diâmetro do eletrodo (mm)</b>	<b>Posição de soldagem</b>	<b>Tipo de corrente</b>	<b>Tensão (v)</b>	<b>Faixa de corrente (a)</b>
3,25	Todas	CA CC+	20 - 25	100 – 145
4,0				130 – 195
5,0				190 – 250

Fonte: Dados especificados pelo fabricante (ESAB)

Tabela 3.5 – Propriedades mecânicas eletrodo revestido E 9018D1

<b>Limite de escoamento (MPa)</b>	<b>Limite de resistência (MPa)</b>	<b>Alongamento (%)</b>
~ 530	~ 670	~ 17%

Fonte: Dados especificados pelo fabricante (ESAB)

## 4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 4.1 DESCRIÇÃO GERAL DO TRABALHO

Este trabalho compreende análise dos processos de soldagem por eletrodo revestido (SMAW - Shielded Metal Arc Welding) e soldagem aluminotérmica (TW - Thermit Welding), aplicados na união de trilhos utilizados em movimentação de pontes rolantes de grande porte (300 toneladas). Os trilhos utilizados para a realização deste trabalho foram do tipo A 100 da norma DIN 536/1991, com duas variações: Aço DIN 536/1991 S700, com variação de carbono entre 0,4% e 0,6% de carbono e aço DIN 536/1991 S900, com variação de carbono entre 0,6% e 0,8%. Esta variação de carbono é capaz de afetar a soldabilidade, além das características mecânicas e metalúrgicas do cordão de solda. As composições químicas sugeridas para os trilhos da Norma DIN 536/1991 S700 e S900, estão apresentadas na TAB. 4.1.

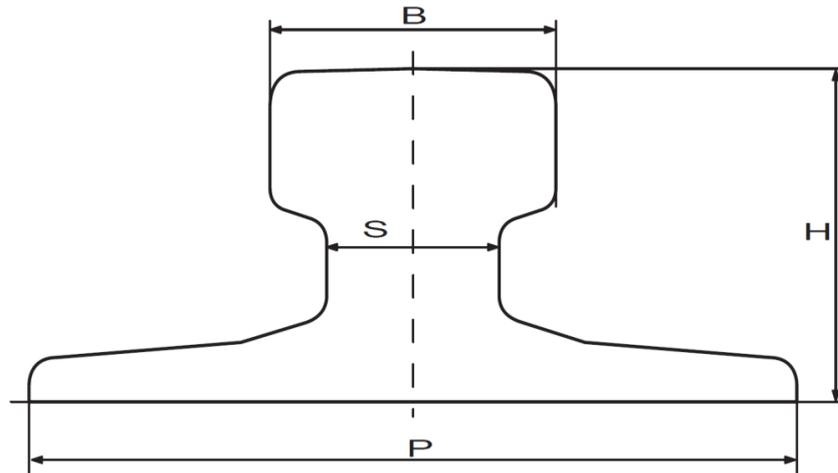
Tabela 4.1 - Composição química (% em peso) dos metais de base

TRILHO A100 (DIN 536/1991)		
Elementos químicos	Composição química especificada aço S700 (*)	Composição química especificada aço S900 (*)
C	0,40 - 0,60	0,60 - 0,80
Mn	0,80 - 1,20	0,80 - 1,30
Si (max)	0,35	0,50
P (max)	0,045	0,045
S (max)	0,045	0,045
Cr	-	
Ni	-	
Mo	-	
V	-	
Alt	-	
N <sub>2</sub> (PPM)	-	

(\*) Composição química especificada pelo fabricante  
Fonte: Grantex

A FIG 4.1 apresenta de forma esquemática o desenho do trilho da Norma DIN 536, utilizado para movimentação de pontes rolantes e objeto de estudo deste trabalho.

**Figura 4.1 - Trilho A100 da norma DIN 536**



P - Patim; H - Altura; B - Boleto; S - Alma  
Fonte: DIN 536-A-Rail-Sections1

A TAB 4.2 apresenta informações referentes a nomenclatura, peso e dimensões do trilho estudado neste trabalho de acordo com a Norma DIN 536.

**Tabela 4.2 – Informações acerca trilho A 100 Norma DIN 536**

<b>Perfil</b>	<b>Peso</b>	<b>Patim (P)</b>	<b>Altura (H)</b>	<b>Boleto (B)</b>	<b>Alma (S)</b>
A 100	74,3 kg/m	200 mm	95 mm	100 mm	60 mm

Fonte: Norma DIN 536

A TAB 4.3 apresenta os valores de resistência a tração e dureza, de acordo com a Norma DIN 536 para os aços S700 e S900.

**Tabela 4.3 - Propriedades mecânicas trilho A100 Norma DIN 536**

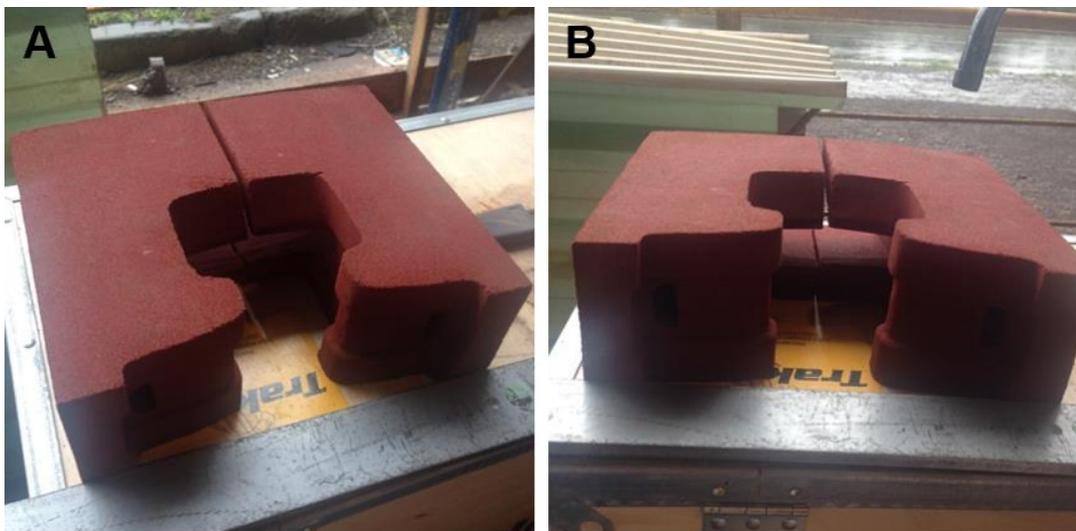
<b>Perfil</b>	<b>Tipo de aço</b>	<b>Limite de escoamento (MPa)</b>	<b>Limite de resistência (MPa)</b>	<b>Dureza Vickers (HV)</b>
A100	S700	~ 480	~ 690	~ 220
A100	S900	~ 615	~ 880	~ 280

Fonte: DIN 536

Para execução do procedimento experimental, foram realizadas soldas utilizando os consumíveis Thermit para o processo TW e eletrodo revestido AWS E 9018 D1 para o processo SMAW. Ainda para o processo de soldagem TW, foram utilizados moldes refratários, enquanto que para o processo SMAW foi necessária a utilização de cobre juntas, para que fosse possível a realização da solda.

As FIGs. 4.2A e 4.2B apresentam um molde refratário utilizado no processo de soldagem TW.

**Figura 4.2 - Moldes refratários utilizados no processo TW,**



Fonte – Próprio autor

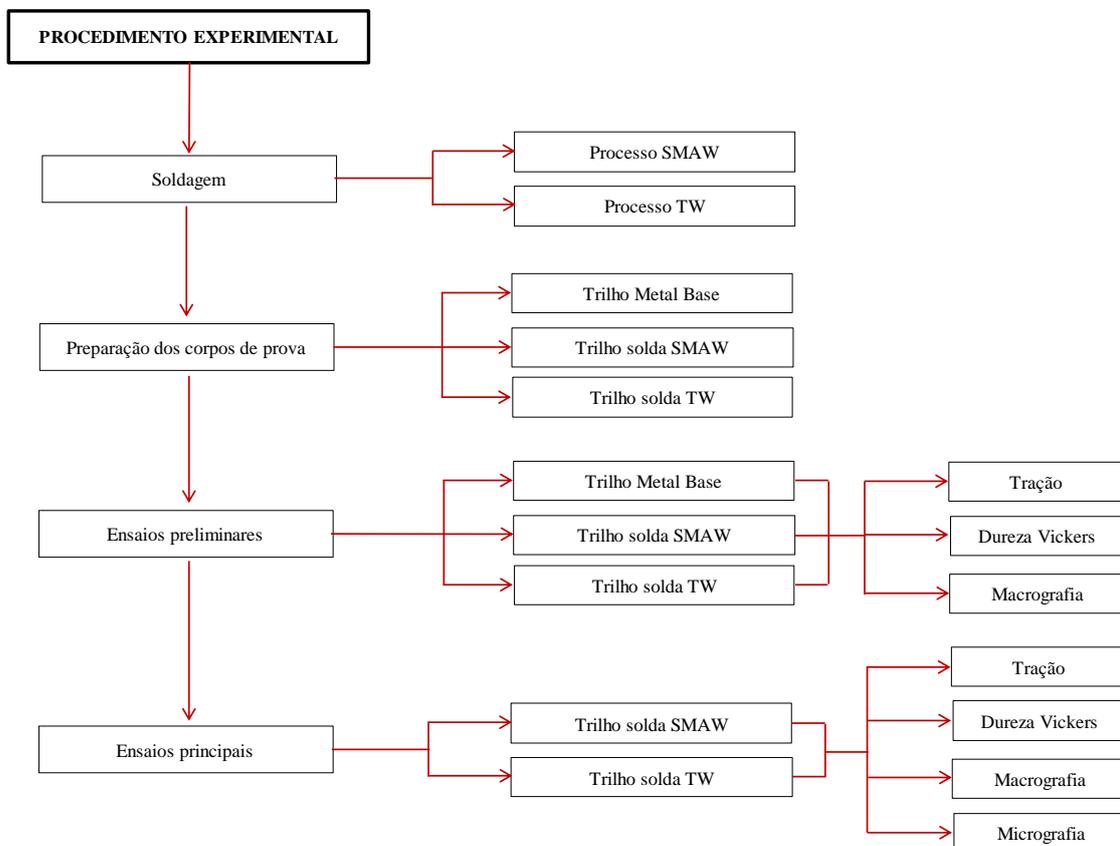
Os trilhos foram preparados para realização das soldas seguindo padrões pré-definidos, descritos no item 4.3 deste capítulo, de forma a garantir a repetibilidade dos testes. As variáveis de soldagem como: corrente, tensão, temperatura de pré e pós-aquecimento, foram monitorados durante a realização do procedimento experimental. A execução do processo SMAW das soldas neste trabalho foi executado de forma manual, enquanto que o procedimento de soldagem TW foi executado com auxílio de equipamentos específicos, que também serão apresentados neste capítulo.

## 4.2 FLUXOGRAMA EXPERIMENTAL

O desenvolvimento experimental deste trabalho foi dividido em quatro etapas, que compreenderam preparação dos trilhos e realização das soldagens, confecção dos corpos de prova, testes preliminares e testes principais. Os testes preliminares foram realizados visando o ajuste dos equipamentos e dos parâmetros dos processos, a fim de garantir repetibilidade dos resultados. Os testes principais seguiram uma especificação de procedimento de soldagem (EPS) que definem as variáveis do processo de soldagem como: corrente de soldagem, tensão, temperatura de pré e pós-aquecimento, caso necessário.

A FIG. 4.3 apresenta esquematicamente a sequência metodológica utilizada para que fosse atingido o objetivo deste trabalho, relacionando cada etapa com a sequência de realização das atividades experimentais.

**Figura 4.3 - Fluxograma experimental**



Fonte – Próprio autor

### 4.3 PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM

#### 4.3.1 Soldagem dos trilhos através do processo de soldagem TW

As soldas realizadas através do processo de soldagem TW, foram executadas em trilhos com o comprimento de 3000 mm e abertura de raiz de 26 mm. Para realização das soldas, foram utilizados somente trilhos com 0,7% de carbono em sua composição química. O comprimento do trilho utilizado para a soldagem TW se difere do processo SMAW devido a restrições impostas pelo processo para execução do mesmo, como fixação e montagem do equipamento para realização das soldas.

Após o corte, as superfícies foram posicionadas e lixadas manualmente para que as impurezas e rebarbas fossem retiradas antes da execução das soldas. Os chanfros preparados para recebimento do processo foram do tipo reto, em decorrência do molde refratário especificado pelo fabricante para realização da soldagem utilizando trilhos do tipo A 100, conforme FIG. 4.1.

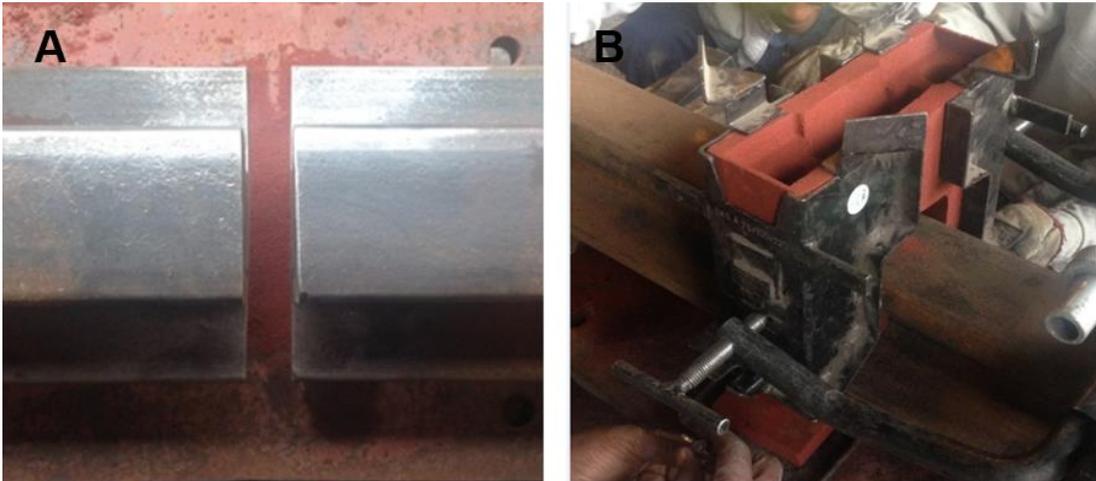
Para realização das soldas, foram seguidos os critérios baseados em informações disponibilizadas pelo fabricante Goldschmidt, parâmetros estes presentes na TAB. 4.4, que estão interligadas ao tempo de execução de cada etapa do processo. Estas etapas contemplam o tempo de pré-aquecimento (dez minutos), tempo de vazamento/abertura do molde (cinco minutos) e o tempo máximo para realização da rebarbagem (nove minutos). As FIGs. 4.4A, 4.4B e 4.5A e 4.5B especificam fases do processo de soldagem TW, sendo posicionamento, preparação, pré aquecimento e rebarbagem, respectivamente.

**Tabela 4.4 – Parâmetros especificados para realização da soldagem TW**

<b>PARÂMETROS</b>	<b>ESPECIFICAÇÃO (*) (tempo)</b>
Tempo pré-aquecimento	10,0 min
Abertura do molde	5,0 min
Rebarbagem	9,0 min

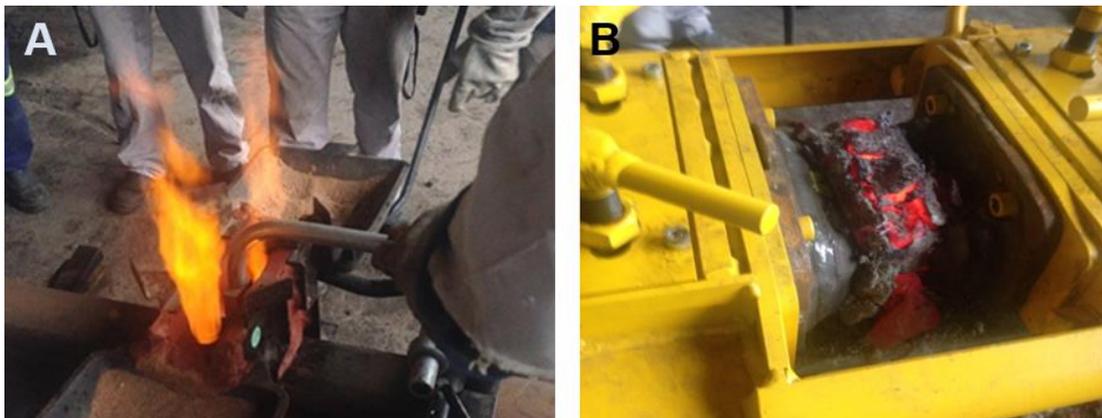
(\*) Dados especificados pelo fabricante Goldschmidt

**Figura 4.4 – Preparação do trilho para realização do processo TW**



Fonte: Próprio autor

**Figura 4.5 – Pré-aquecimento e rebarbagem**



Fonte: Próprio autor

#### **4.3.2 Soldagem dos trilhos através do processo de soldagem SMAW**

As soldas realizadas através do processo de soldagem SMAW, foram executadas em trilhos com o comprimento de 150 mm e abertura de raiz de 30 mm. As superfícies foram posicionadas e lixadas manualmente para que as rebarbas e impurezas fossem retiradas antes da execução das soldas. Os chanfros preparados foram do tipo reto, visando a otimização no consumo de eletrodos e minimizando os efeitos do aporte térmico durante a soldagem, sendo necessária ainda, a utilização de dispositivos auxiliares para evitar o empeno dos trilhos A 100. A soldagem foi realizada na posição plana com polaridade direta e executada por filetes. O consumível especificado para

realização das soldas foi o AWS E 9018 D1, conforme apresentado na revisão bibliográfica, item 3.4.6.

A FIG. 4.6 apresenta o trilho em fase de preparação antes de ser soldado através do processo SMAW.

**Figura 4.6 – Trilhos preparados para soldagem através do processo SMAW**



Fonte: Próprio autor

Na TAB. 4.5 está apresentada a composição química do consumível AWS E 9018D1, especificado pelo fabricante.

**Tabela 4.5 - Composição química para consumível AWS E 9018 D1**

<b>Elementos químicos</b>	<b>Composição química AWS E9018D1 (*)</b>
C	0,12
Mn	1,0 – 1,75
Si (máx)	0,8
P (Max)	0,05
S (Max)	0,04
Cr	-
Ni (Max)	0,9
Mo	0,25 – 0,45

(\*) Composição química especificada pelo fabricante

Conforme mencionado anteriormente, para realização do procedimento de soldagem, uma EPS foi utilizada. Neste documento, todos os parâmetros inerentes à realização da solda estão especificados, sendo que, corrente de soldagem, tensão e posição de soldagem são regulados em função do consumível, enquanto temperatura de pré-aquecimento e temperatura interpasse são obtidos através do cálculo de carbono equivalente. O controle de resfriamento é realizado visando a não ocorrência de trincas, principalmente devido ao hidrogênio difusível. Foram realizadas soldas utilizando trilhos S700 e S900, da norma DIN536.

As temperaturas de pré-aquecimento e de aquecimento interpasse foram selecionadas através do cálculo do carbono equivalente ( $C_{eq}$ ) utilizando a Eq. 4.1, desenvolvida pelo International Institute of Welding – IIW, sendo uma derivação da equação de Dearden e O'Neill (KASUYA; HASHIBA, 2006), que é definida de acordo com a composição química do metal de base para percentuais de carbono acima de 0,4 %,

$$C_{eq} = \% C + \frac{\% Mn}{6} + \frac{\% Mo}{4} + \frac{\% Cr}{5} + \frac{\% Ni}{15} + \frac{\% Cu}{5} + \frac{\% P}{3} \quad (4.1)$$

$$C_{eq} = 0,93$$

A TAB 4.6 fornece valores sugeridos de temperaturas de pré-aquecimento para diferentes valores de carbono equivalente:

**Tabela 4.6 - Temperatura de pré-aquecimento Recomendada x  $C_{eq}$**

<b>Carbono equivalente – <math>C_{eq}</math> (%)</b>	<b>Temperatura de pré-aquecimento recomendada</b>
≤ 0,3	Opcional
0,31 – 0,45	100 a 200° C
0,45 – 0,60	200 a 250° C
≥ 0,60	250 a 300° C
Aços ferramenta, aços mola, aços de composição desconhecida,	~ 300°C

Fonte: Metalurgia da soldagem - ESAB

De acordo com os cálculos realizados através da Eq. 4.1 e dos dados fornecidos pela TAB. 4.5, a temperatura de pré-aquecimento definida:

$$T_{\text{préaq}} = 250 \text{ à } 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Os parâmetros definidos para realização das soldas, conforme mencionado anteriormente, utilizando a EPS para o processo de soldagem SMAW estão apresentados na TAB. 4.7.

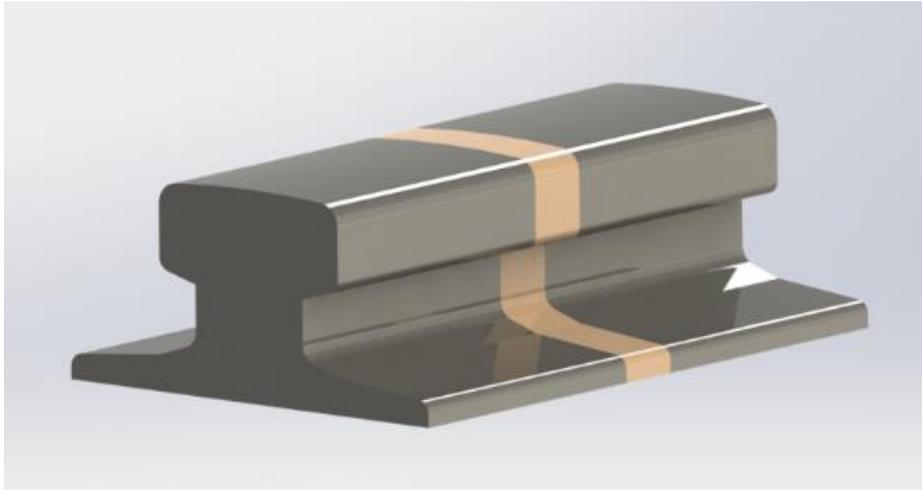
**Tabela 4.7 - Parâmetros para realização da soldagem com processo SMAW**

<b>Parâmetros</b>	<b>Especificação</b>
Diâmetro do eletrodo	5,0 mm
Passe de raiz (corrente de soldagem)	160 A
Passe de enchimento (corrente de soldagem)	200 A
Passe de acabamento (corrente de soldagem)	180 A
Oscilação nos passes	Nenhuma
Pré-aquecimento	250 a 300° C
Temperatura interpasse	200 a 300° C
Resfriamento	Lento, protegido por cal ou manta
Esmerilhamento	Entre 100 e 120 °C
Tratamento térmico	Não se aplica

Fonte: Próprio autor

Os parâmetros apresentados na TAB 4.6 visam a obtenção de soldas que apresentem características metalúrgicas e mecânicas requeridas para os esforços sofridos pelos trilhos durante sua utilização. A FIG, 4.5 temos um modelo 3D representativo do trilho acabado, após a realização da solda através do processo SMAW.

**Figura 4.7 - Representação 3D do trilho soldado através do processo SMAW**



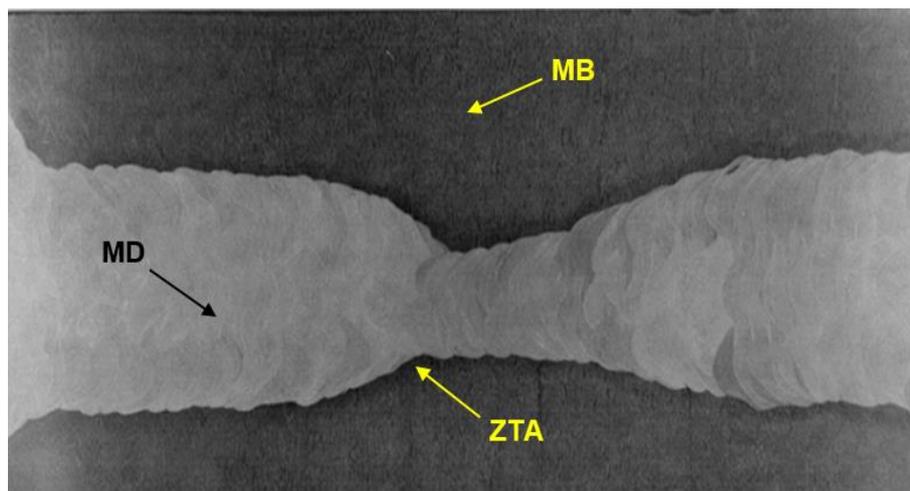
Fonte – Próprio autor

## **4.4 ENSAIOS MECÂNICOS E METALÚRGICOS**

### **4.4.1 Macrografia longitudinal**

Alterações ocorridas no material em decorrência do processo de soldagem podem ser identificados através da análise macrográfica, conforme FIG. 4.8.

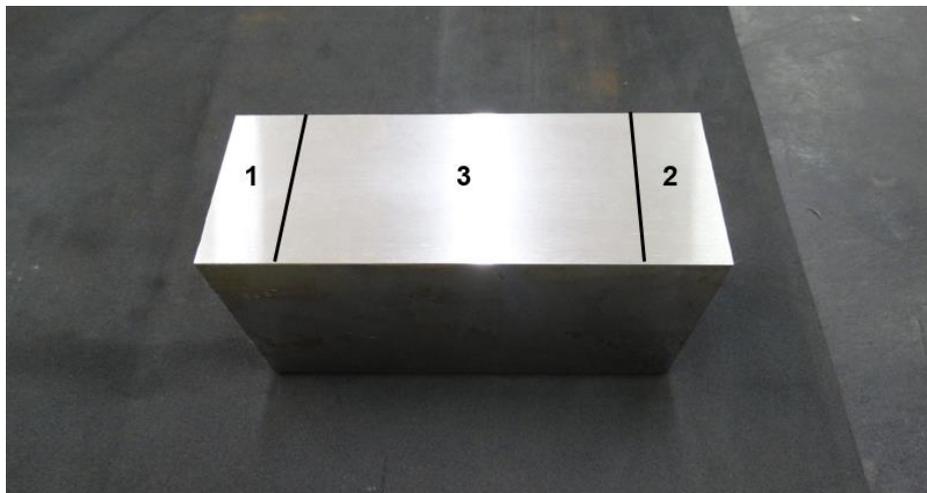
**Figura 4.8 – Aspecto macroestrutural de uma junta soldada**



Fonte: treinasolda.com.br

O acabamento superficial para ataque macrográfico foi preparado em retífica com rebolo de óxido de alumínio branco, grão 46. A preparação das amostras foi realizada através do procedimento usual. As peças foram lixadas com lixas de diferentes granulometrias (#180, #240, #320, #400 e #600). O reagente utilizado para revelação das regiões foi Nitáqua na proporção de 25% da mistura de ácido nítrico e 75% de água. A FIG. 4.9 possui o corpo de prova retificado, retirado longitudinalmente do trilho utilizado para este trabalho, para ataque químico. Esta figura contém também as regiões utilizadas para realização da análise química do metal de base, (regiões 1 e 2) e metal depositado (região 3).

**Figura 4.9 – Corpo de prova preparado para ensaio macrográfico**



Fonte: próprio autor

#### **4.4.2 Microscopia ótica e eletrônica de varredura**

A identificação das microestruturas, aliada aos ensaios mecânicos, possibilita a realização de um estudo acerca do comportamento mecânico de cada junta soldada. A microscopia ótica foi realizada nas três principais regiões da junta soldada: metal de base, metal depositado e ZTA, visando identificação das microestruturas presente em cada uma delas.

Para a análise da microestrutura, os corpos de prova foram lixados de acordo com o procedimento da macrografia, apresentados no item anterior, e polidos com pasta de diamante (9 $\mu$ m, 3 $\mu$ m e 1 $\mu$ m). O ataque químico da superfície a ser analisada foi feito

por aplicação com reativo Nital 3% (3% de ácido nítrico e os outros 97 % de álcool etílico P.A.). Neste caso, foram realizadas análises através de microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV), sendo essa última utilizando tensão de 15kV e detecção de imagens de elétrons secundários. Na FIG. 4.10 está identificada a preparação do corpo de prova para realização da micrografia.

**Figura 4.10 – Preparação do corpo de prova para ensaio micrográfico**



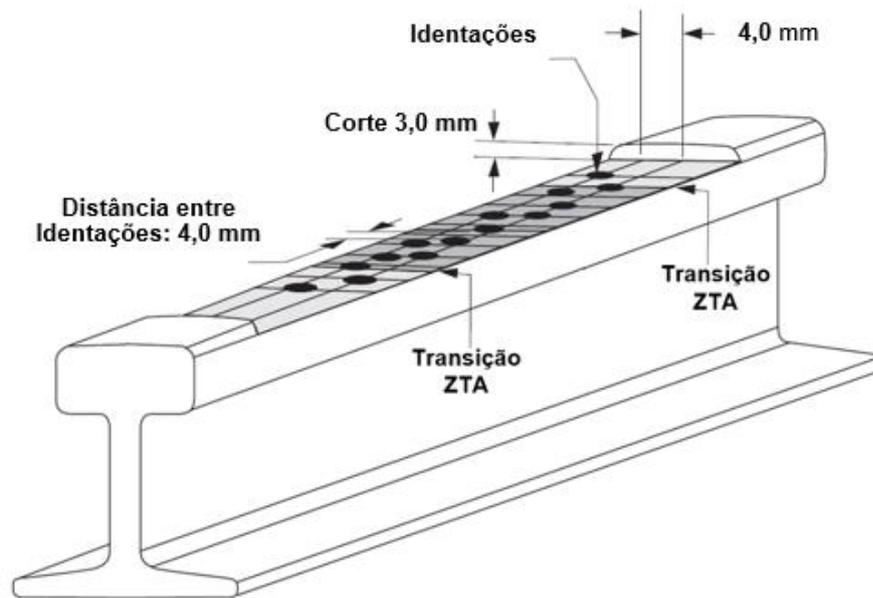
Fonte: próprio autor

#### **4.4.3 Ensaio de dureza**

O ensaio de dureza aplicado neste trabalho foi do tipo Vickers, cujo método é baseado na resistência que o material oferece à penetração de uma pirâmide de diamante de base quadrada e ângulo entre faces de  $136^\circ$ , sob uma determinada carga. O valor de dureza Vickers (HV) é o quociente da carga aplicada (F) pela área de impressão (A) deixada no corpo ensaiado. A carga para realização da penetração utilizada nos corpos de prova deste trabalho foram de 50kg.

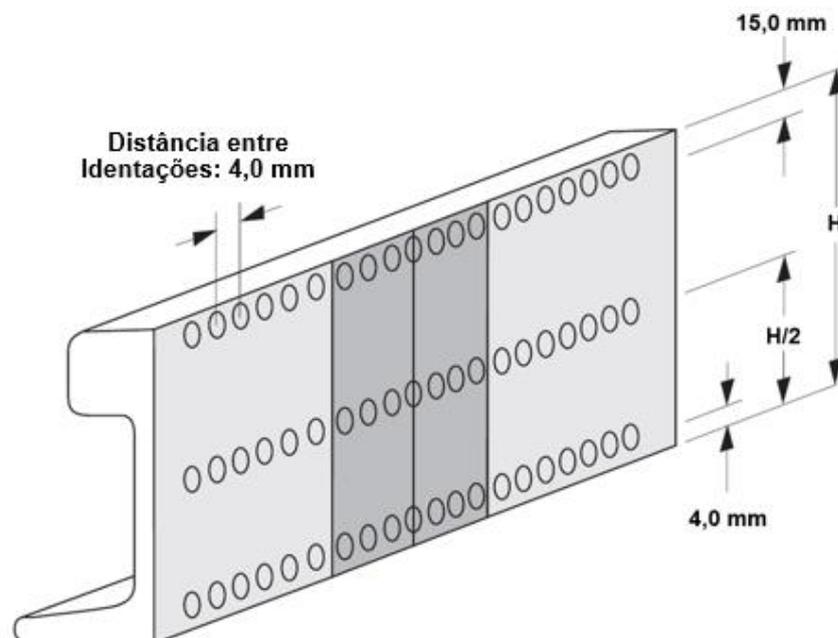
Para medição de dureza na seção transversal do trilho A 100, conforme realizado neste trabalho, o corpo de prova deve estar de acordo com a norma AWS D15.2, que possui todos os requisitos para a correta realização do teste. O acabamento na seção transversal requer uma preparação mínima até a lixa grão 220, seguido da realização de ataque químico da junta para que seja revelada a região da ZTA. Nas s FIGs. 4.11 e 4,12 estão apresentados esquematicamente o corpo de prova para realização do ensaio de dureza, conforme norma AWS D15.2.

Figura 4.11 – Corpo de prova para medição de dureza na superfície



Fonte: Norma AWS D15.2

Figura 4.12 - Corpo de prova para medição de dureza na seção transversal



Fonte: Norma AWS D15.2

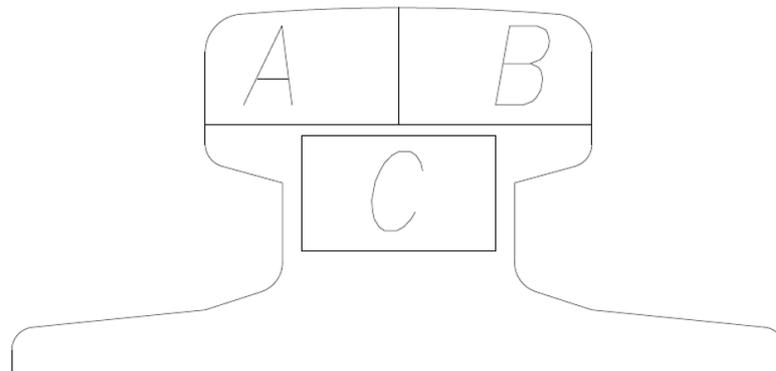
#### 4.4.4 Ensaio de tração

A resistência mecânica de um material depende de sua capacidade de suportar a carga sem deformação ou ruptura. Essa propriedade é inerente ao próprio material e deve ser determinada por ensaios. Um dos mais importantes a ser realizado nesse sentido é o teste de tração (HIBBELER, 2008).

Para a confecção dos corpos de prova de tração deste trabalho, foram utilizadas as normas DIN 536 e ASTM A 370, que apresentam as regiões relevantes para retirada do material (junta soldada) e especificam as dimensões necessárias para criação dos mesmos.

As FIG. 4.13 apresenta as regiões de onde foram retirados materiais para confecção dos corpos de prova para o ensaio de tração deste trabalho, segundo norma ASTM A 370.

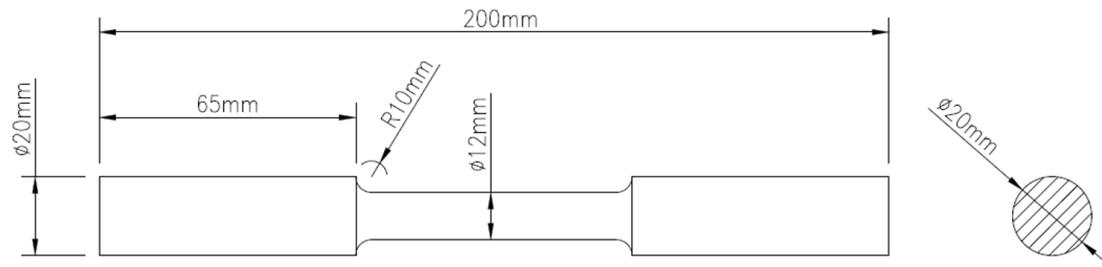
**Figura 4.13 – Regiões de retirada dos corpos de prova de tração**



Fonte: Próprio autor.

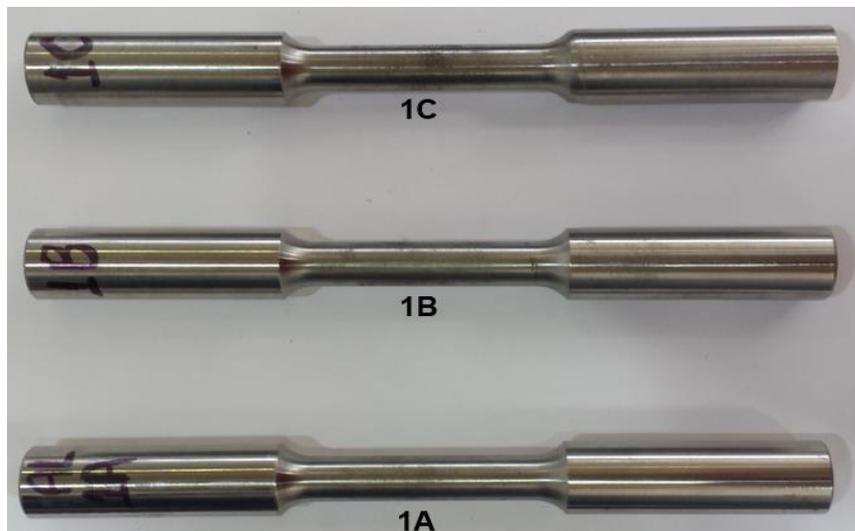
Os corpos de prova para o ensaio de tração foram confeccionados segundo a norma ASTM A 370 e as FIGs 4.14 e 4.15 apresentam suas dimensões e identificações, respectivamente.

**Figura 4.14 – Padrão para confecção dos corpos de prova de tração**



Fonte: Próprio autor

**Figura 4.15 – Corpo de prova confeccionado para realização do ensaio de tração, conforme Norma ASTM A 370**



Fonte: próprio autor

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **5.1 INTRODUÇÃO**

Neste Capítulo, serão apresentados os resultados obtidos através dos experimentos realizados nas juntas soldadas pelos processos de soldagem TW e SMAW. Serão apresentados os resultados das propriedades mecânicas das soldas (limite de escoamento, tração e perfil de dureza), composição química e microestruturas encontradas nas soldas.

Os processos de soldagem serão apresentados separadamente, divididos em tópicos que vão desde a análise do metal de base aos resultados do ensaio de tração. Cada tópico terá seu resultado correlacionado com os demais, a fim de criar uma identidade acerca de cada processo. Em um segundo momento, uma análise comparativa entre os processos será apresentada, a fim de identificar qual o método mais eficiente para aplicação na soldagem de trilhos da norma DIN 536 de acordo com as necessidades requeridas em um processo siderúrgico.

### **5.2 RESULTADO DA SOLDAGEM REALIZADA COM O PROCESSO TW - METAL DE BASE AÇO DIN 536-S900**

#### **5.2.1 Análise química do metal de base**

Os resultados da análise química do metal podem ser vistos na TAB 5.1. As regiões do metal de base onde os testes foram realizados correspondem as identificações 1 e 2 apresentadas na FIG 4.9, item 4.4.1.

Como esperado e de acordo com a composição química especificada pelo fabricante dos trilhos na TAB 4.1, item 4.1, todos os elementos estão dentro da faixa especificada.

Ainda em concordância com a análise química realizada, conforme FIG 4.9, item 4.4.1, não ocorreram variações na composição das regiões 1 e 2.

**Tabela 5.1 - Composição química (% em peso) do metal de base trilho DIN 536-S900**

<b>Trilho A100 (DIN 536/1991)</b>		
<b>Elementos químicos</b>	<b>Composição química analisada região 1</b>	<b>Composição química analisada região 2</b>
C	0,72	0,73
Mn	1,22	1,22
Si	0,25	0,25
P	0,022	0,022
S	0,004	0,005
Cr	0,02	0,02
Ni	0,01	0,01
Mo	0	0

Fonte: próprio autor.

### **5.2.2 Análise química do metal depositado**

A região do metal depositado onde os testes foram realizados corresponde a identificação 3 da FIG 4.9, item 4.4.1. Os resultados da análise química do metal depositado estão apresentados na TAB 5.2.

**Tabela 5.2 - Composição química (% em peso) do metal depositado trilho DIN536-S900 soldado com o processo de soldagem TW**

<b>TRILHO A100 (DIN 536/1991)</b>	
<b>ELEMENTOS QUÍMICOS</b>	<b>COMPOSIÇÃO QUÍMICA ANALISADA REGIÃO 3</b>
C	0,57
Mn	0,71
Si	0,93
P	0,017
S	0,004
Cr	0,02
Ni	0,01
Mo	0

Fonte: próprio autor.

Analisando os resultados da composição química do metal de base e do metal depositado, verifica-se que a quantidade de carbono presente no metal depositado (MD = 0,57 %) é 28 % menor que a quantidade presente no metal de base (MB = 0,72 %). O aumento do percentual de carbono, geralmente, confere maior dureza e maior resistência mecânica ao material. No caso do material em estudo, a quantidade de carbono presente nas regiões, aliado ao percentual de manganês de 1,22 % no metal de base contra 0,71%, no metal depositado, uma diferença de 42 %, podem contribuir para que haja maior dureza e resistência mecânica no metal de base.

A quantidade de fósforo em níveis acima de 0,06 %, pode contribuir com a fragilização do material e diminuição do alongamento. Os níveis devem ser mantidos abaixo de 0,04 %. O metal de base possui 0,022 % de fósforo, enquanto o metal depositado possui 0,017 %, uma diferença de 23 %. A diferença na quantidade de fósforo pode interferir na ductilidade do material, contudo, como os dois valores estão abaixo de 0,04 %, esta característica pouco interfere nas propriedades mecânicas.

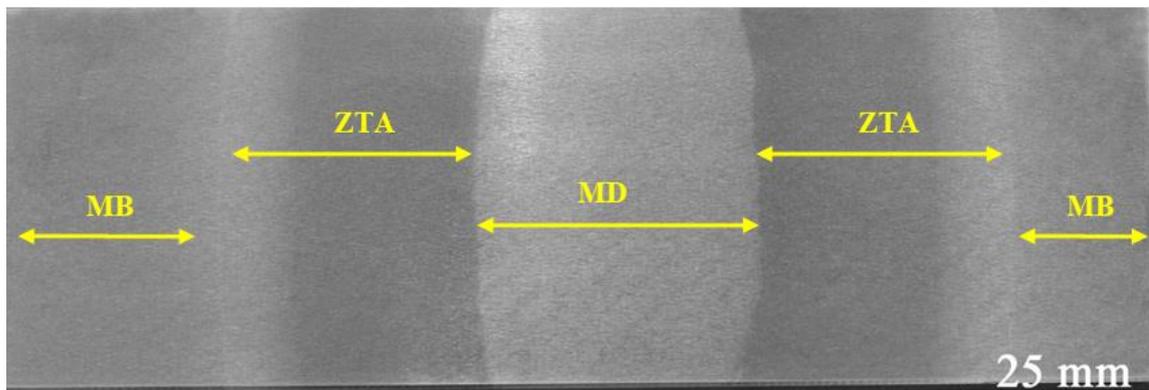
A presença da mesma quantidade de cromo nas composições químicas do metal de base e do metal soldado (0,02 %), pode proporcionar uma resistência homogênea a abrasão.

Vale salientar que, quantidades de carbono acima de 0,5 %, influenciam diretamente na soldabilidade dos aços, sendo que, quanto maior quantidade de carbono presente na estrutura, mais difícil a realização da solda. Isso se deve à formação de uma microestrutura martensítica, a qual possui elevada dureza e baixa tenacidade, causando assim a formação de trincas a frio.

### 5.2.3 Resultados da macrografia longitudinal

Na FIG 5.1 é observado o aspecto macroestrutural da solda, quando a solda foi feita utilizando o processo de soldagem, onde ficam evidentes as principais regiões da junta soldada.

**Figura 5.1 – Aspecto macroestrutural do processo TW soldado com Aço DIN 536 S900**



MB: Metal de base  
MD: Metal depositado  
ZTA: Zona termicamente afetada  
Fonte: próprio autor.

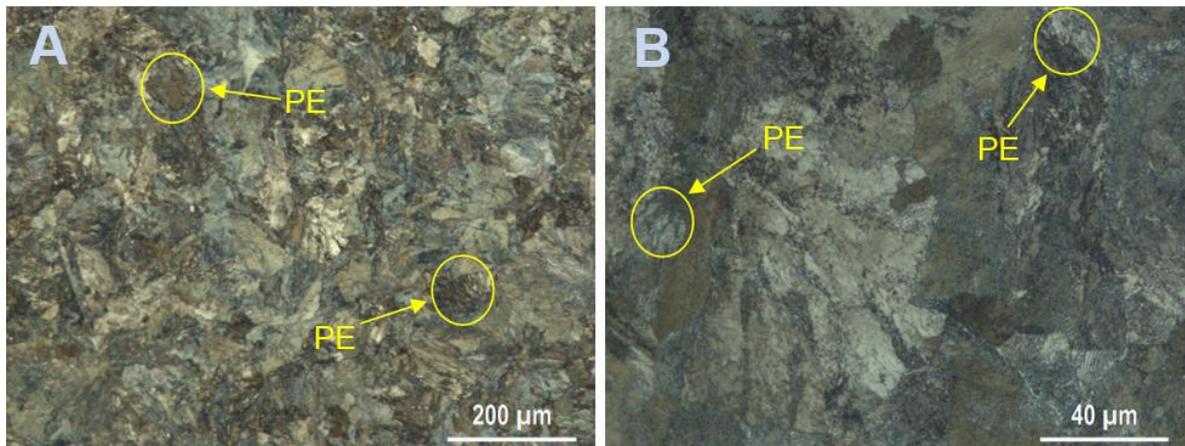
#### 5.2.4 Resultado da microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura (MEV)

##### ✓ Metal de base

Após preparação da amostra para realização da metalografia, ficou evidenciado que a microestrutura básica do metal de base é perlítica. Sob o aspecto de propriedades mecânicas, a perlita é um material interessante par ser aplicado em projetos de engenharia. Conjuga uma matriz dúctil, proveniente da ferrita, a um reforço alinhado de alta dureza, proveniente da cementita.

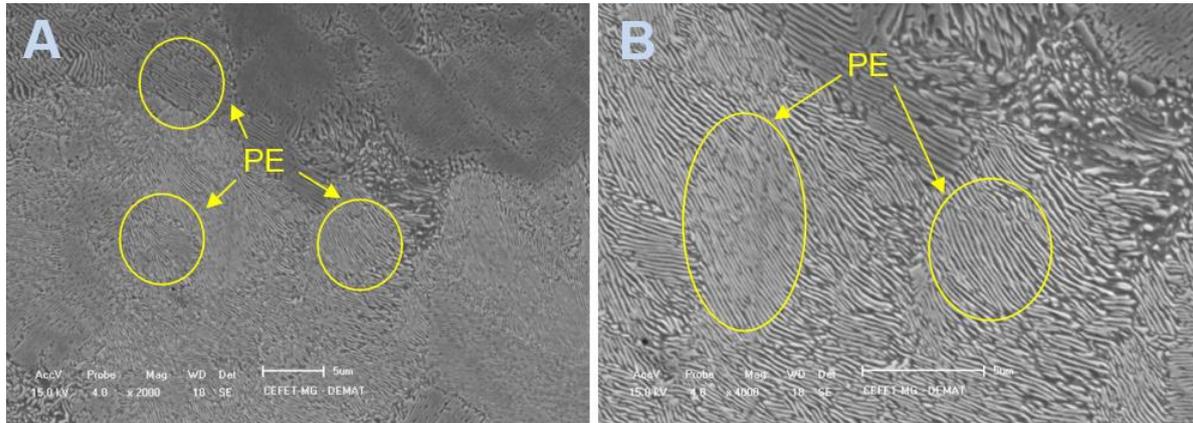
Nas FIGs 5.2A e 5.2B, fica evidenciada a presença da perlita no metal de base. As lamelas de ferrita e cementita que constituem a perlita podem ser identificadas na FIG 5.3A. Na FIG 5.3B é apresenta de forma mais visível a microestrutura perlítica, com a cementita em alto relevo (regiões claras) em relação à ferrita (regiões escuras).

**Figura 5.2 - Aspecto microestrutural do metal de base trilho A100 soldado com Aço DIN 536 S900 com aumentos de 100(FIG.A) e 500(FIG.B) vezes.**



PE: Perlita  
Fonte: próprio autor.

**Figura 5.3 - Aspecto microestrutural do metal de base trilha A100 soldado com Aço DIN 536 S900 com aumentos de 2000(FIG.A) e 4000(FIG.B) vezes.**



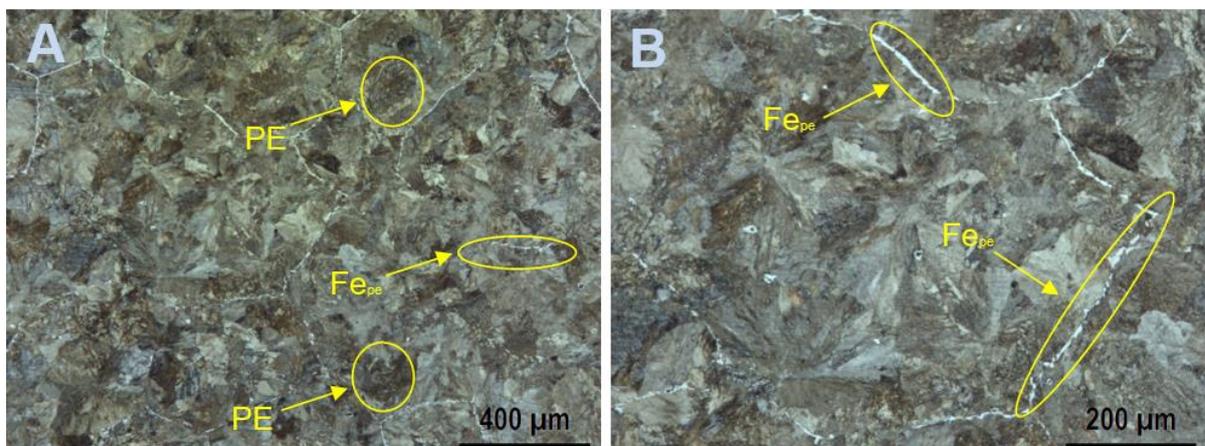
PE: Perlita

Fonte: próprio autor.

### ✓ Metal depositado

Na região do metal depositado, a estrutura do material é constituída por perlita e ferrita proeutetóide. A ferrita proeutetóide confere ao aço dureza e resistência mecânica inferiores às de um aço constituído somente com ferrita eutetóide, no entanto, devido à maior quantidade de ferrita, sua tenacidade tende a ser maior. A perlita e a ferrita proeutetóide (regiões mais claras nas figuras), estão identificadas nas FIGs 5.4A e 5.4B. Nas FIGs 5.5A e 5.5B fica evidenciada a microestrutura do metal depositado, onde estão evidenciadas a presença de perlita e ferrita proeutetóide.

**Figura 5.4 - Aspecto microestrutural do metal depositado soldado através do processo TW com Aço DIN 536 S900 com aumentos de 50(FIG.A) e 100(FIG.B) vezes.**

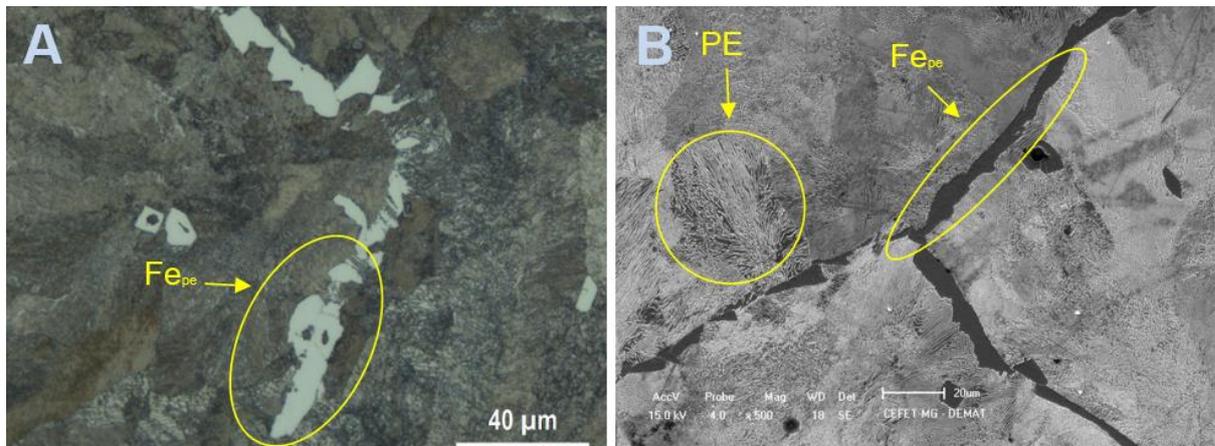


PE: Perlita

Fe<sub>pe</sub>: Ferrita proeutetóide

Fonte: próprio autor.

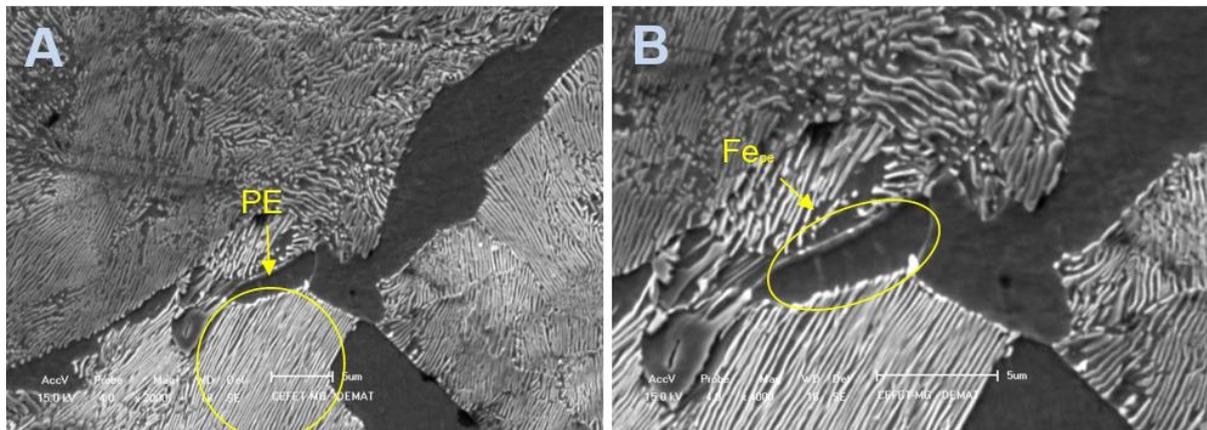
**Figura 5.5 - Aspecto microestrutural do metal depositado soldado através do processo TW com aumento de 500 vezes**



PE: Perlita  
 Fe<sub>pe</sub>: Ferrita proeutetóide  
 Fonte: próprio autor.

Na FIG 5.6A, fica evidenciada a presença de perlita. A FIG. 5.6B apresenta a microestrutura do metal depositado, onde a ferrita proeutetóide fica evidenciada (regiões escuras na figura).

**Figura 5.6 - Aspecto microestrutural do metal depositado soldado através do processo TW soldado com Aço DIN 536 S900 com aumentos de 2000(FIG.A) e 4000(FIG.B) vezes**



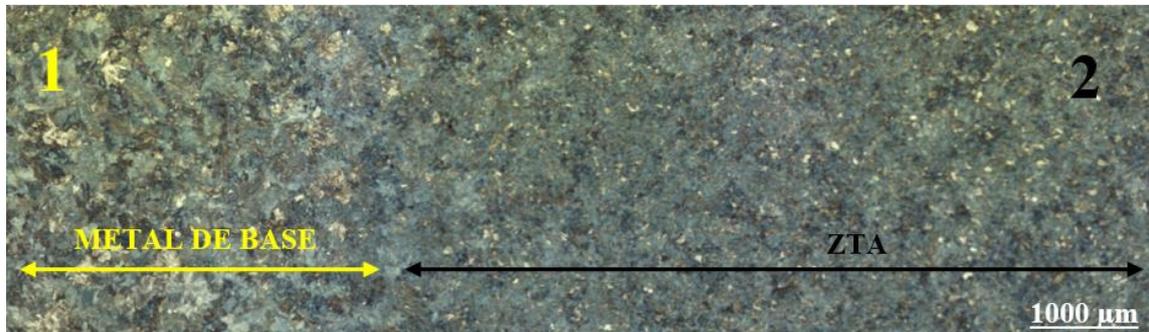
PE: Perlita  
 Fe<sub>pe</sub>: Ferrita proeutetóide  
 Fonte: próprio autor.

#### ✓ Zona termicamente afetada

Na zona termicamente afetada, foram encontradas duas estruturas distintas. Na região da ZTA próximo a transição com o metal de base, foi encontrada perlita com maior nível de desorganização. Na região da ZTA próximo a transição com metal

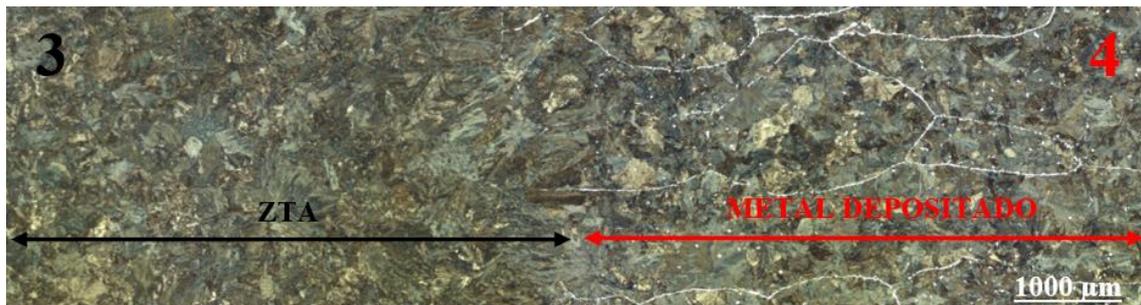
depositado, foi encontrada perlita e ferrita. As FIGs 5.7 e 5.8 apresentam as microestruturas das regiões encontradas.

**Figura 5.7 – Microestrutura na zona de transição metal de base com a ZTA no processo de soldagem TW soldado com Aço DIN 536 S900 com 25 vezes de aumento.**



ZTA: Zona termicamente afetada  
Fonte: próprio autor

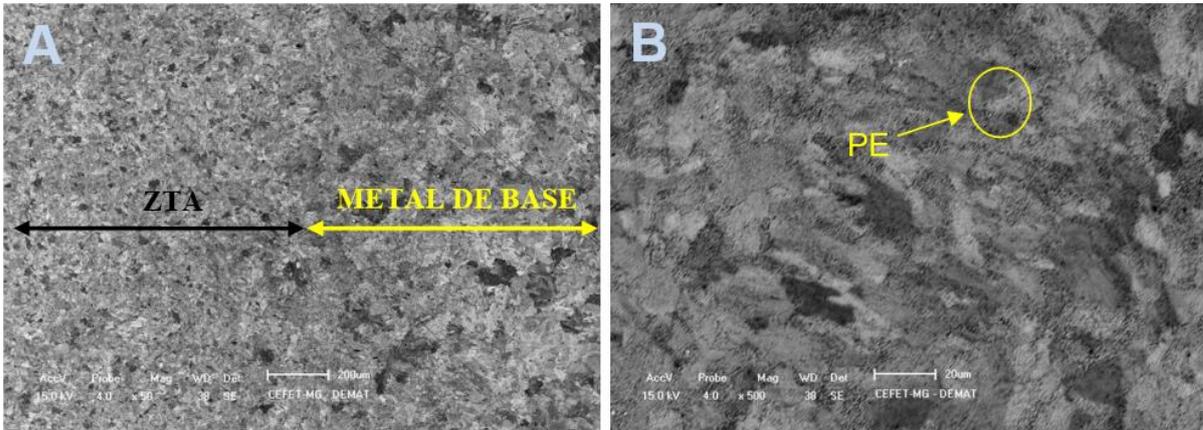
**Figura 5.8 – Microestrutura na zona de transição entre a ZTA e o metal depositado no processo de soldagem TW soldado com Aço DIN 536 S900 com 25 vezes de aumento**



ZTA: Zona termicamente afetada  
Fonte: próprio autor.

Na FIG 5.9A, fica evidenciada a microestrutura na zona de transição entre o metal de base e a ZTA. A FIG 5.9B apresenta o íncio da ZTA, próximo ao metal de base. Nela pode ser observada a presença de perlita fina.

**Figura 5.9 – Microestrutura na zona de transição entre o metal de base e a ZTA no processo de soldagem TW soldado com Aço DIN 536 S900 com aumentos de 50(FIG.A) e 500(FIG.B) vezes.**

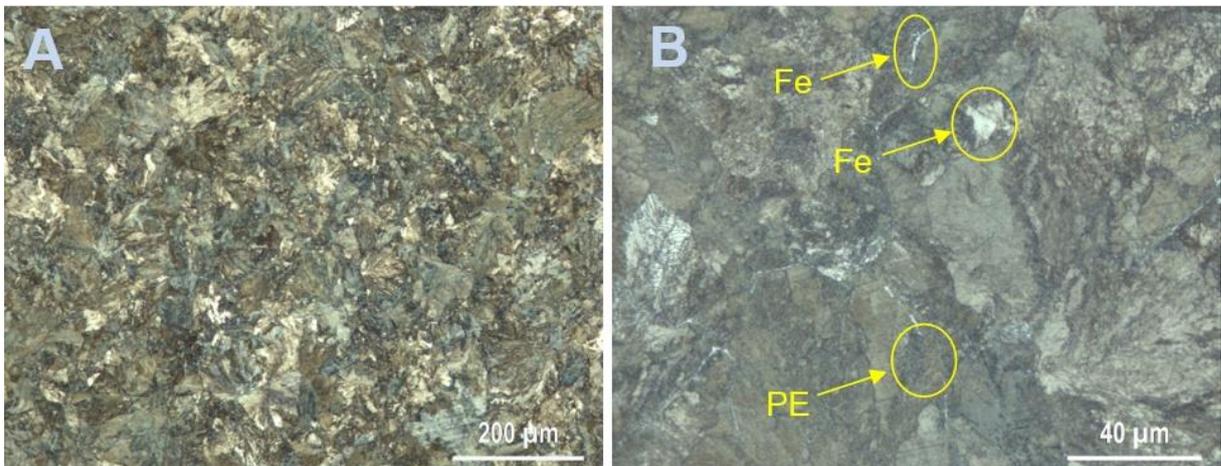


PE: Perlita

Fonte: próprio autor.

As FIGs 5.10A e 5.10B representam a microestrutura na zona termicamente afetada, próxima à transição entre ZTA e metal depositado. As FIGs. 5.11A e 5.11B apresentam a mesma região. Nestas figuras, podem ser observadas a presença de perlita e alguma formação de ferrita proeutetóide.

**Figura 5.10– Microestrutura na ZTA próximo ao metal depositado com aumento de 100(FIG.A) e 500(FIG.B) vezes no processo de soldagem TW soldado com Aço DIN 536 S900**

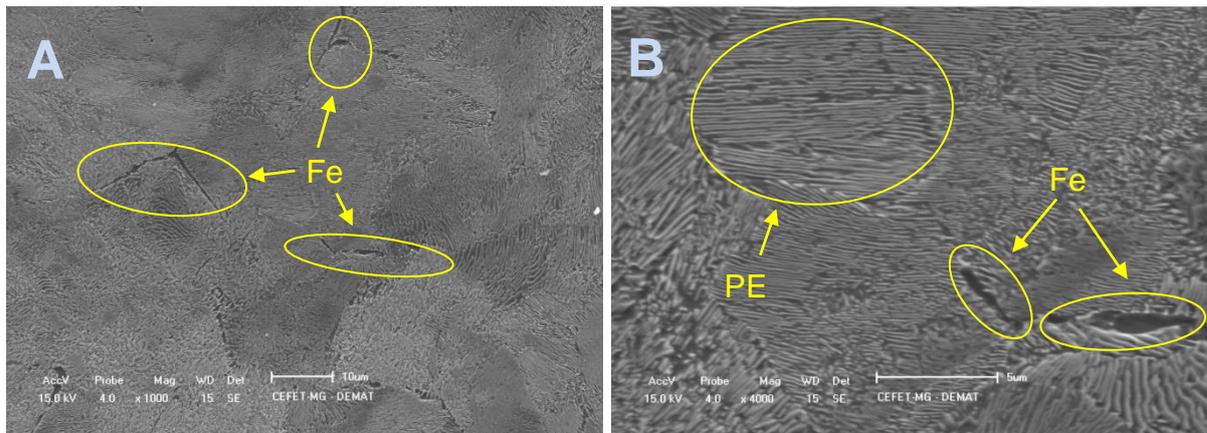


PE: Perlita

Fe: Ferrita

Fonte: próprio autor.

**Figura 5.11 – Microestrutura na ZTA próximo ao metal depositado com aumento de 1000(FIG.A) e 4000(FIG.B) vezes no processo de soldagem TW soldado com Aço DIN 536 S900**



PE: Perlita

Fe: Ferrita

Fonte: próprio autor.

### 5.2.5 Dureza Vickers

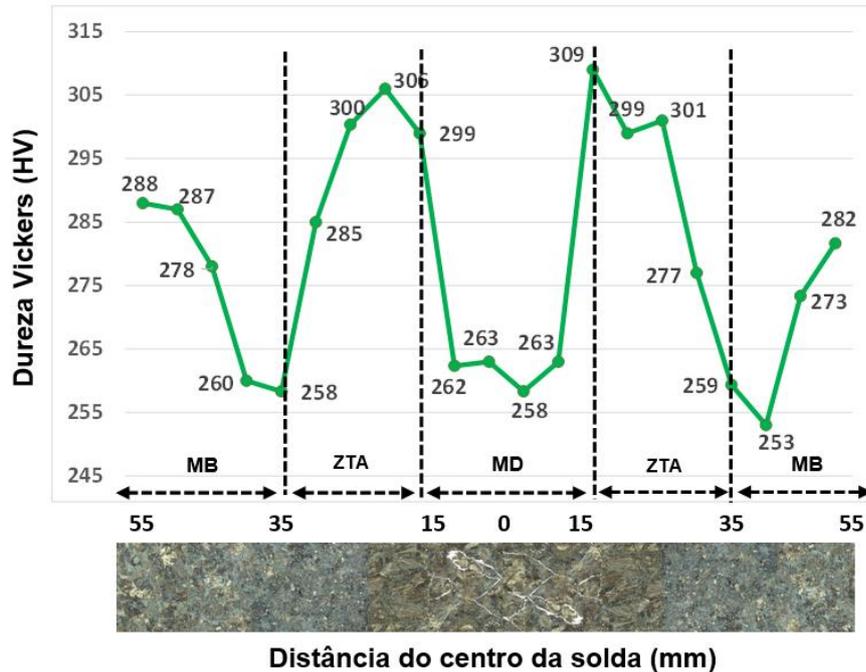
A formação da microestrutura e conseqüentemente a variação da dureza nas regiões de uma junta soldada estão ligadas basicamente a três fatores:

- Composição química do material;
- Temperatura de aquecimento e tempo de manutenção nesta temperatura;
- Velocidade de resfriamento.

As variações de dureza ao longo do perfil soldado estão apresentadas na FIG. 5.12.

Pode-se verificar que o perfil de dureza do trilho soldado apresentou homogeneidade, conforme apresentado também na revisão bibliográfica, possuindo dureza máxima (309 HV) na transição entre ZTA e metal depositado e dureza mínima (253 HV) no metal de base, próximo a ZTA. No ponto de maior dureza (309 HV), foi observado a presença de perlita e alguma formação de ferrita. No ponto de menor dureza (253 HV), pode ser observado a presença de estrutura perlítica.

**Figura 5.12 – Perfil de dureza transversal ao longo do perfil soldado através do processo TW com Aço DIN 536 S900.**



Fonte: próprio autor.

### 5.2.6 Tração

O ensaio de tração foi realizado conforme metodologia apresentada no item 4.4.4. Durante a realização deste ensaio, foi observado que a ruptura dos corpos de prova ocorria preferencialmente na ZTA. Na FIG. 5.13 está representada o corpo de prova de tração rompido na ZTA. No ponto de ruptura dos corpos de prova, foi observado valor de dureza máximo de 300 HV.

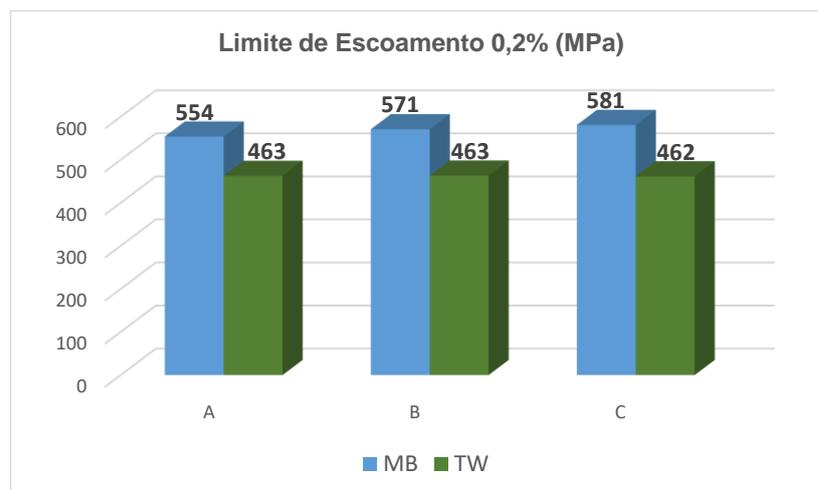
O aumento da dureza geralmente está aliado a perda de ductilidade, acarretado na fragilização do material. Tais características ocasionam a diminuição do limite de escoamento, limite de resistência e do alongamento. Estes comportamentos podem ser observados nas FIGs 5.14, 5.15 e 5.16, que fornecem os resultados de tração do corpo de prova proveniente do metal de base e do corpo de prova oriundo do processo de soldagem TW. Ainda conforme metodologia, os itens A, B e C nos gráficos representam as regiões de onde os corpos de prova foram retirados.

Figura 5.13 – Corpo de prova rompido após realização do ensaio de tração.



Fonte: próprio autor

Figura 5.14 – Limite de escoamento metal de base e trilha soldado processo TW soldado com Aço DIN 536 S900

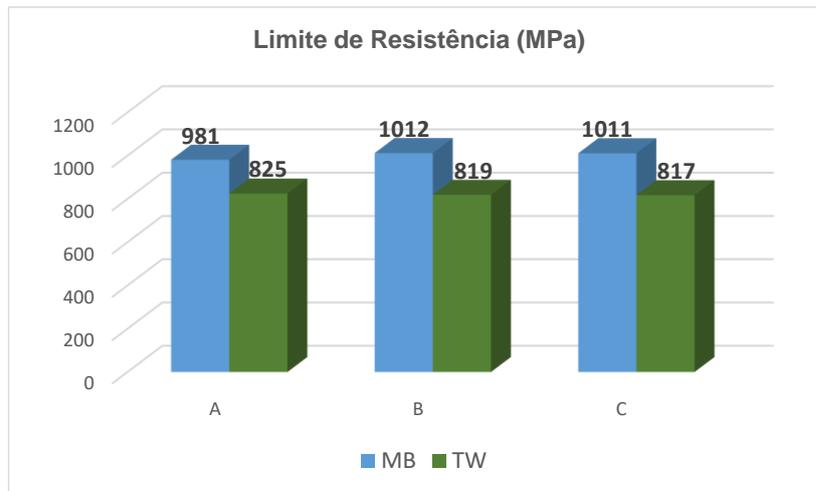


MB: Metal de base

TW: Soldagem aluminotérmica

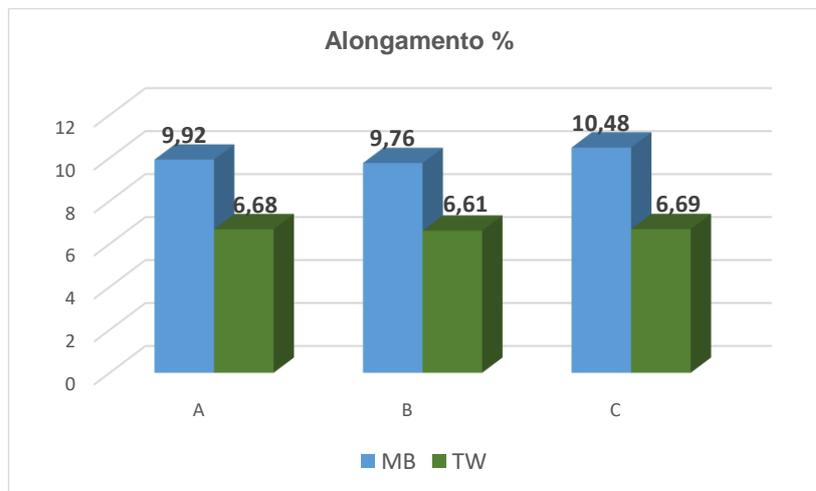
Fonte: próprio autor

**Figura 5.15 – Limite de resistência metal de base e trilho soldado processo TW soldado com Aço DIN 536 S900**



MB: Metal de base  
 TW: Soldagem aluminotérmica  
 Fonte: próprio autor

**Figura 5.16 - Alongamento percentual metal de base e trilho soldado processo TW soldado com Aço DIN 536 S900**



MB: Metal de base  
 TW: Soldagem aluminotérmica  
 Fonte: próprio autor

O metal de base possui um limite de escoamento máximo de 581 MPa, contra um valor máximo de 462 MPa do material soldado através do processo TW, uma diferença percentual de 20%. O limite de resistência máximo do metal de base, 1012 MPa, também é 20% maior que o limite de resistência máximo do metal soldado, 817 MPa.

A diferença no alongamento é de 37%, possuindo seu valor máximo no metal de base de 10,48, contra 6,61 no metal soldado.

### 5.3 RESULTADO DA SOLDAGEM REALIZADA COM O PROCESSO SMAW - METAL DE BASE AÇO DIN 536-S900

#### 5.3.1 Resultado da análise do metal de base

Os resultados da análise química do metal de base estão apresentados na TAB 5.3 e conforme esperado e de acordo com a composição química especificada pelo fabricante dos trilhos na TAB 4.1, item 4.1, todos os elementos estão dentro da faixa especificada.

Tabela 5.3 - Composição química (% em peso) do metal de base trilho DIN536 S900

Trilho A100 (DIN 536/1991)		
Elementos químicos	Composição química analisada região 1	Composição química analisada região 2
C	0,76	0,76
Mn	1,24	1,23
Si	0,26	0,26
P	0,027	0,026
S	0,007	0,007
Cr	0,02	0,02
Ni	0,01	0,01
Mo	0	0

Fonte: próprio autor.

#### 5.3.2 Resultado da análise do metal depositado

A análise química do metal depositado foi realizada via espectrômetro óptico. A região do metal depositado onde os testes foram realizados corresponde a identificação 3 da

FIG 4.9 do procedimento experimental. Os resultados da análise química do metal de base estão apresentados na TAB 5.4.

**Tabela 5.4 - Composição química (% em peso) do metal depositado trilho DIN536-S900 soldado com o processo de soldagem SMAW**

<b>TRILHO A100 (DIN 536/1991)</b>	
<b>ELEMENTOS QUÍMICOS</b>	<b>COMPOSIÇÃO QUÍMICA ANALISADA REGIÃO 3</b>
C	0,07
Mn	1,73
Si	0,28
P	0,02
S	0,01
Cr	0,05
Ni	0,39
Mo	0,40

Fonte: próprio autor.

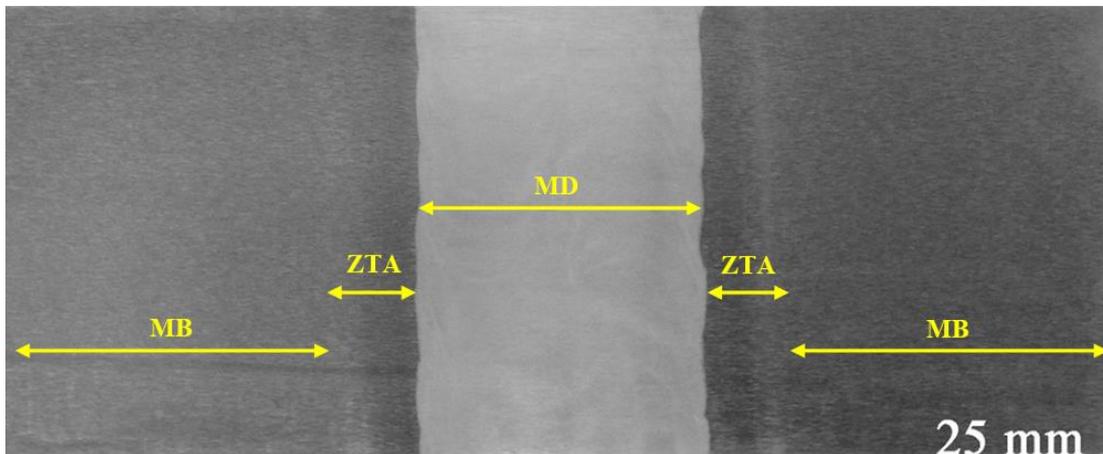
Analisando os resultados da composição química do metal de base e do metal depositado, verifica-se que a quantidade de carbono presente no metal depositado (MD = 0,07%) é 91% menor que a quantidade presente no metal de base (MB = 0,76%). A quantidade de carbono no metal depositado, aliado ao grande aporte térmico gerado no procedimento de soldagem, foi determinante para a formação da microestrutura do metal depositado, que tendeu ser ferrítica com grãos grosseiros, influenciados também pela taxa de resfriamento, acarretando muitas vezes em materiais com baixa resistência mecânica e baixa dureza. Contudo, o aumento percentual de 30% na quantidade de manganês presente no metal depositado, contribui para o aumento da dureza e da resistência mecânica. O aumento de 60% de cromo na composição do metal depositado provoca uma maior resistência mecânica e a abrasão. Vale ressaltar que, conforme mencionado no item 5.2.2, o alto teor do

carbono influencia diretamente a soldabilidade dos aços, sendo que, quanto maior a quantidade de carbono presente na estrutura, mais difícil a realização da solda.

### 5.3.3 Macrografia longitudinal

A FIG 5.17 apresenta o aspecto macroestrutural da solda, quando foi utilizado o processo de soldagem SMAW. A influência do ciclo térmico de soldagem está descrita no item 5.2.3.

**Figura 5.17 – Aspecto macroestrutural da soldagem com processo SMAW soldado com Aço DIN 536 S900**



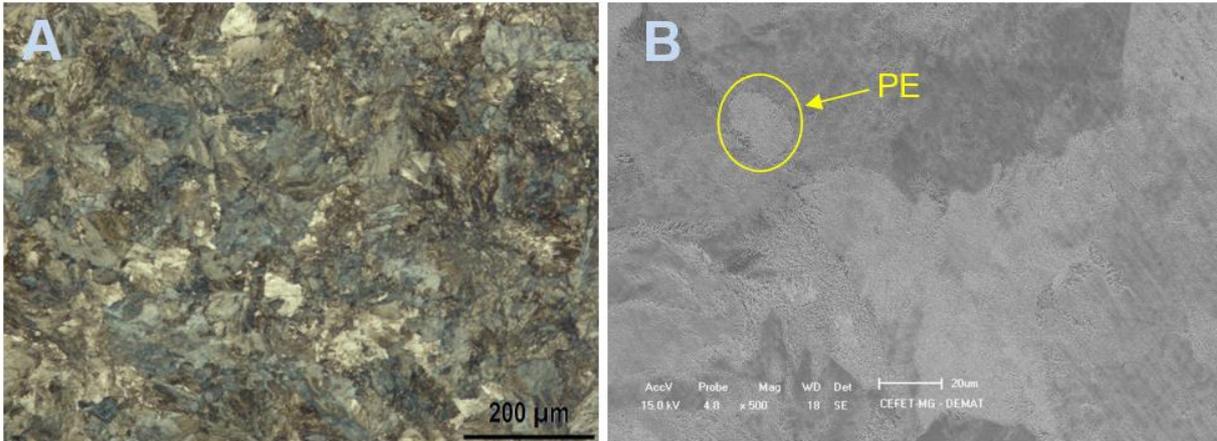
MB: Metal de base  
 MD: Metal depositado  
 ZTA: Zona termicamente afetada  
 Fonte: próprio autor.

### 5.3.4 Resultado da Microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura (MEV)

#### ✓ Metal de base

Após preparação da amostra para realização da metalográfica, ficou evidenciado que a microestrutura básica do metal de base é perlítica, conforme pode ser observado nas FIGs 5.18A e 5.18B, que evidenciam a presença de perlita no metal de base. Vale ressaltar que, a microestrutura é similar à apresentada no item 5.3.4, metal de base.

**Figura 5.18 - Aspecto microestrutural do metal de base trilho A100 soldado com Aço DIN 536 S900 com aumentos de 100(FIG.A) e 500(FIG.B) vezes.**



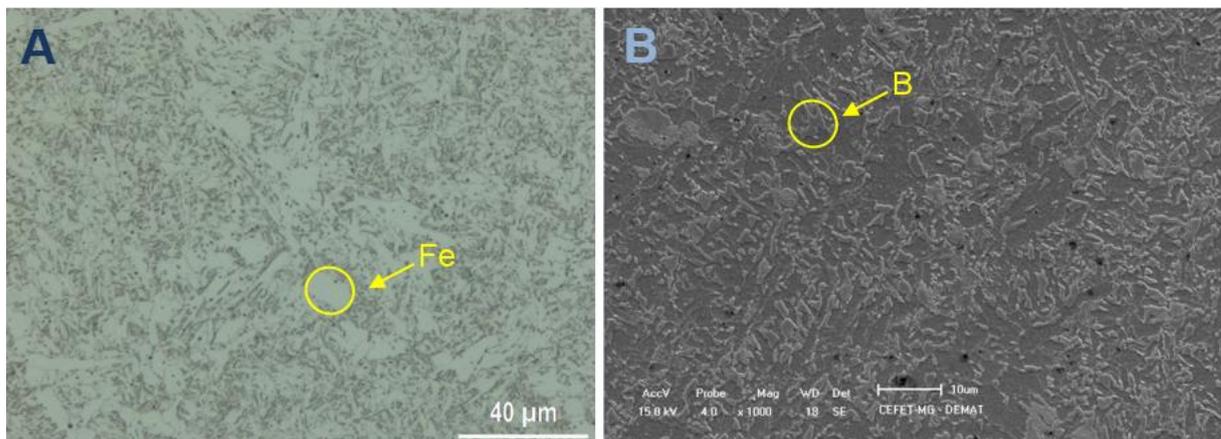
PE: Perlita

Fonte: próprio autor.

### ✓ Metal depositado

Na região do metal depositado, a estrutura do material é constituída por uma matriz ferrítica com possível presença de bainita, conforme FIGs. 5.19A e 5.19B e FIGs 5.20A e 5.20B.

**Figura 5.19 - Aspecto microestrutural do metal depositado soldado através do processo SMAW soldado com Aço DIN 536 S900 com aumentos de 500(FIG.A) e 1000(FIG.B) vezes.**

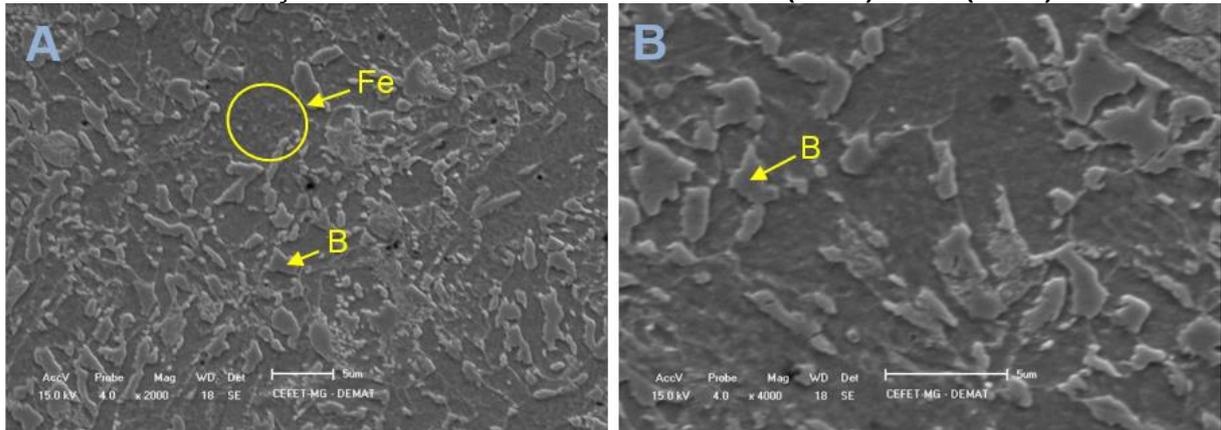


Fe: Ferrita

B: Bainita

Fonte: Próprio autor

**Figura 5.20 - Aspecto microestrutural do metal depositado soldado através do processo SMAW soldado com Aço DIN 536 S900 com aumentos de 2000(FIG.A) e 4000(FIG.B) vezes.**



Fe: Ferrita

B: Bainita

Fonte: Próprio autor

A possível formação de bainita, conforme visualizado nas FIGs 5.21A e 5.21B, pode estar ligada a grande quantidade de carbono no metal de base e a alta velocidade de resfriamento. Este tipo de estrutura possui elevada dureza, originando grandes tensões residuais, o que pode acarretar muitas vezes em trincas na superfície e o interior do material.

#### ✓ Zona termicamente afetada

Na zona termicamente afetada, foram encontradas duas regiões com estruturas distintas. Na região da ZTA próximo a transição com o metal de base, foi encontrada estrutura perlítica com ferrita proeutetóide. Na região da ZTA próximo a transição com metal depositado, foi observado perlita recristalizada com ferrita proeutetóide no contorno dos grãos. A FIG 5.21 apresenta a microestrutura das regiões encontradas na ZTA.

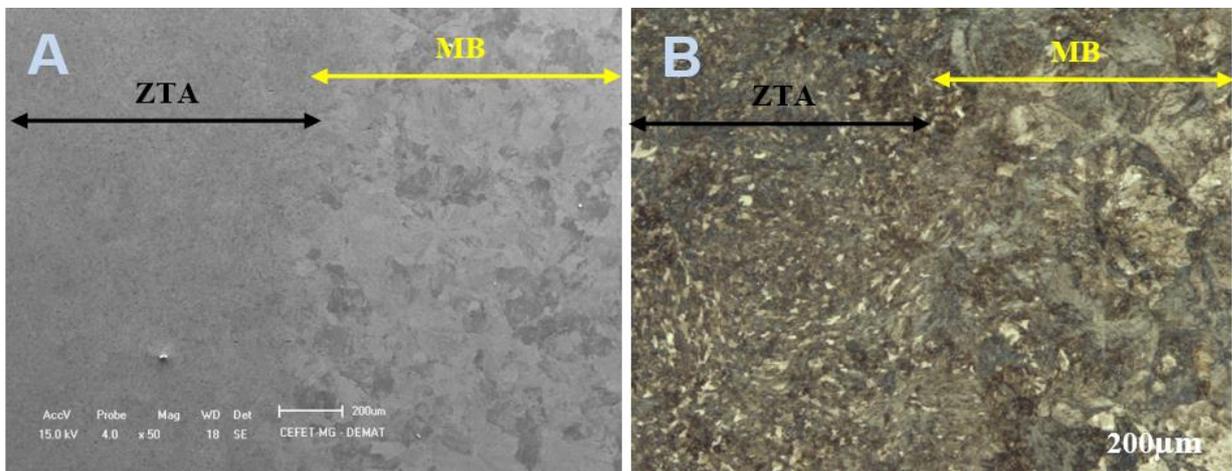
**Figura 5.21 - Microestrutura na ZTA no processo de soldagem SMAW soldado com Aço DIN 536 S900 com aumento de 25 vezes.**



MB: Metal de base  
 MD: Metal depositado  
 ZTA: Zona termicamente afetada  
 Fonte: próprio autor.

As FIGs 5.22A e 5.22B apresentam a microestrutura na zona de transição entre o metal de base e a ZTA, onde podem ser observadas a presença de perlita na região do metal de base e perlita e ferrita proeutetóide, na região da ZTA.

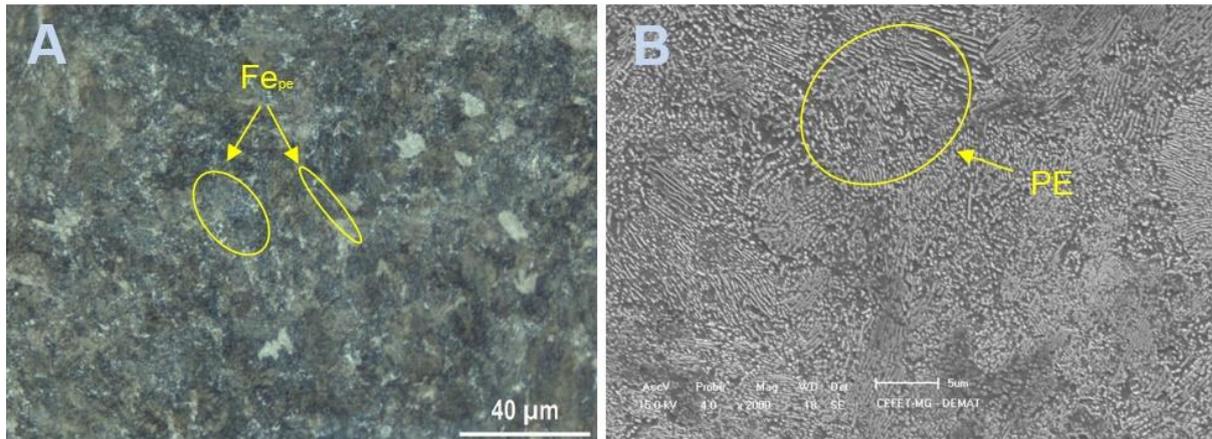
**Figura 5.22 - Microestrutura na transição metal de base e ZTA no processo de soldagem SMAW soldado com Aço DIN 536 S900 com aumentos de 50(FIG.A) e 100(FIG.B) vezes.**



MB: Metal de base  
 ZTA: Zona termicamente afetada  
 Fonte: próprio autor.

As FIGs 5.23A e 5.23B apresentam a microestrutura na ZTA próximo ao metal de base, onde podem ser observadas a presença de perlita com ferrita proeutetóide.

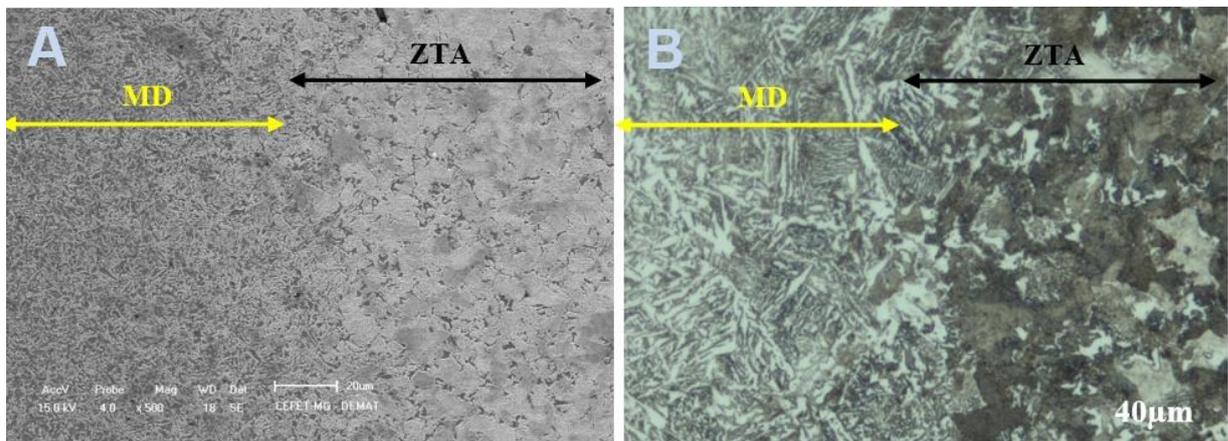
**Figura 5.23 – Microestrutura na ZTA próximo ao metal de base soldado com processo SMAW soldado com Aço DIN 536 S900 com 500(FIG.A) e 2000(FIG.B) vezes**



PE: Perlita  
 Fe<sub>pe</sub>: Ferrita proeutetóide  
 Fonte: próprio autor.

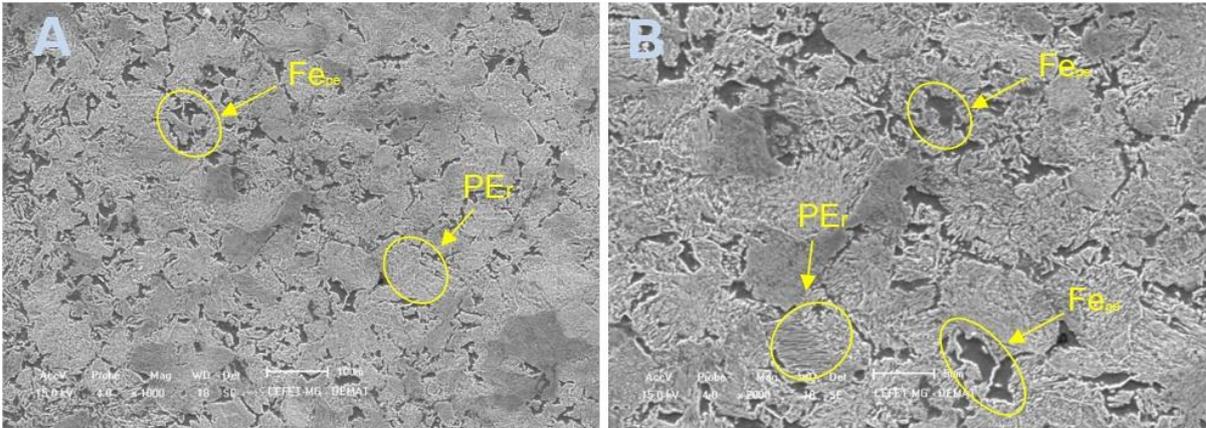
As FIGs 5.24A e 5.24B apresentam a microestrutura na zona de transição entre a ZTA e o metal depositado, onde podem ser observadas perlita recristalizada com ferrita proeutetóide nos contornos dos grãos. As FIGs 5.25A e 5.25B apresentam estas estruturas em detalhe.

**Figura 5.24 - Microestrutura na transição metal depositado e ZTA no processo de soldagem SMAW soldado com Aço DIN 536 S900 com aumentos de 500 vezes**



MD: Metal depositado  
 ZTA: Zona termicamente afetada  
 Fonte: próprio autor.

**Figura 5.25 – Microestrutura na ZTA próximo ao metal depositado soldado com processo SMAW soldado com Aço DIN 536 S900 com aumento de 1000(FIG.A) e 2000(FIG.B) vezes**



PE<sub>r</sub>: Perlita recristalizada  
 Fe<sub>pe</sub>: Ferrita proeutetóide  
 Fonte: próprio autor.

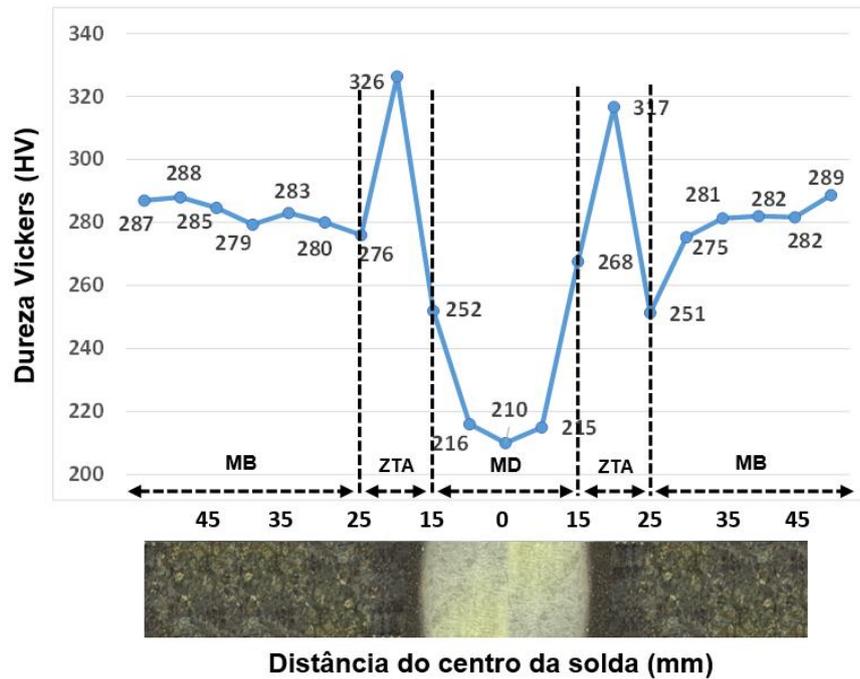
### 5.3.5 Dureza Vickers

A formação da microestrutura e conseqüentemente a variação da dureza nas regiões de uma junta soldada estão ligadas a três fatores que estão descritos no item 5.2.5.

As variações de dureza ao longo do perfil soldado são observadas nas FIG. 5.26.

O perfil de dureza do trilho soldado apresentou homogeneidade, possuindo dureza máxima (326 HV) na ZTA e dureza mínima (210 HV) no metal depositado. No ponto de maior dureza, foi observada a presença de perlita e alguma formação de ferrita proeutetóide. No ponto de menor dureza, pôde ser observada a presença de ferrita.

**Figura 5.26 – Perfil de dureza transversal ao longo do perfil soldado através do processo SMAW com Aço DIN 536 S900**



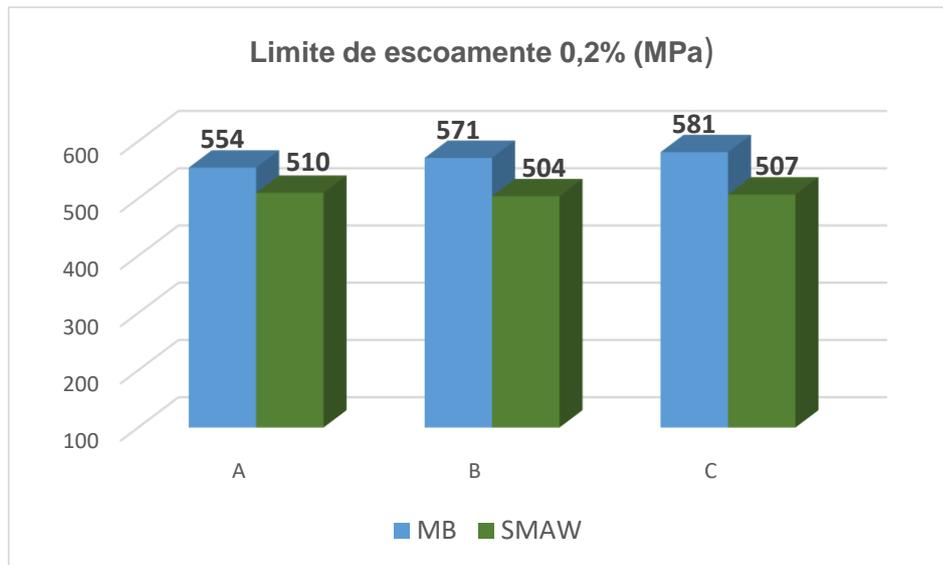
MB: Metal de base  
 MD: Metal depositado  
 ZTA: Zona termicamente afetada  
 Fonte: próprio autor.

### 5.3.6 Tração

O ensaio de tração foi realizado conforme metodologia apresentada no item 4.4.4. Durante a realização deste ensaio, foi observado que a ruptura dos corpos de prova ocorreu preferencialmente na ZTA.

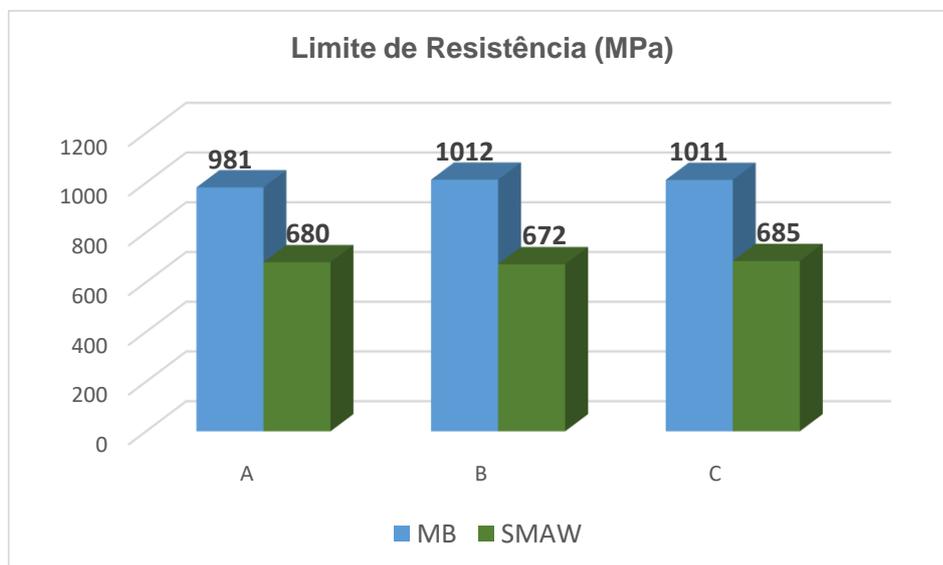
No ponto de ruptura dos corpos de prova, foi observado valor de dureza máximo de 326 HV. As FIGs 5.27, 5.28 e 5.29 apresentam os resultados de tração do corpo de prova proveniente do metal de base e do corpo de prova oriundo do processo de soldagem SMAW.

**Figura 5.27 – Limite de escoamento metal de base do trilho soldado através processo SMAW com Aço DIN 536 S900**



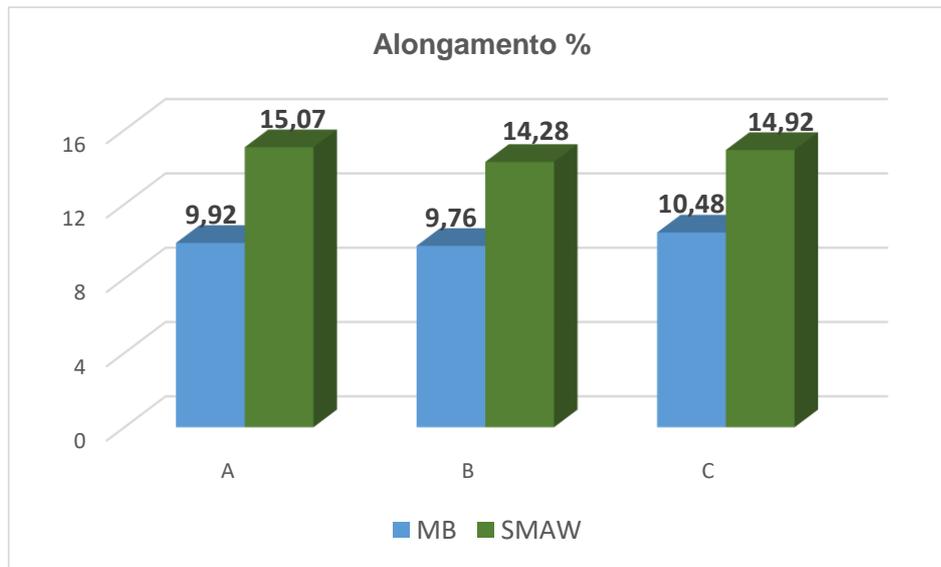
MB: Metal de base  
TW: Soldagem aluminotérmica  
Fonte: próprio autor

**Figura 5.28 - Limite de resistência metal de base do trilho soldado através processo SMAW com Aço DIN 536 S900**



MB: Metal de base  
TW: Soldagem aluminotérmica  
Fonte: próprio autor

**Figura 5.29 - Alongamento percentual metal de base do trilho soldado através processo SMAW com Aço DIN 536 S900**



MB: Metal de base  
 TW: Soldagem aluminotérmica  
 Fonte: próprio autor

O metal de base possui um limite de escoamento máximo de 581 MPa, contra um valor máximo de 510 MPa do material soldado através do processo SMAW, uma diferença percentual de 12%. O limite de resistência máximo do metal de base, 1012 MPa é 32% maior que o limite de resistência máximo do metal soldado, 685 MPa. A diferença no alongamento é de 30%, possuindo seu valor máximo no metal soldado, 15,07, contra 10,48 no metal de base, possivelmente devido a quantidade de carbono presente em cada região.

## **5.4 RESULTADO DA SOLDAGEM REALIZADA COM O PROCESSO SMAW - METAL DE BASE AÇO DIN 536-S700**

### **5.4.1 Resultado da análise do metal de base**

Os resultados da análise química do metal de base estão apresentados na TAB 5.5.

Como esperado e de acordo com a composição química especificada pelo fabricante dos trilhos, todos os elementos estão dentro do especificado.

**Tabela 5.5 - Composição química (% em peso) do metal de base trilho DIN 536 S700**

<b>Trilho A100 (DIN 536/1991)</b>		
<b>Elementos químicos</b>	<b>Composição química analisada região 1</b>	<b>Composição química analisada região 2</b>
C	0,55	0,55
Mn	1,02	1,01
Si	0,29	0,29
P	0,016	0,017
S	0,015	0,013
Cr	0,03	0,03
Ni	0,02	0,02
Mo	0,01	0,01

Fonte: próprio autor.

#### **5.4.2 Análise química do metal depositado**

A análise química do metal depositado foi realizada via espectrômetro óptico. A região do metal depositado onde os testes foram realizados corresponde a identificação 3 da FIG 5.30. Os resultados da análise química do metal de base estão apresentados na TAB 5.6.

**Tabela 5.6 - Composição química (% em peso) do metal depositado trilho DIN536 S700 soldado com o processo de soldagem SMAW**

<b>TRILHO A100 (DIN 536/1991)</b>	
<b>ELEMENTOS QUÍMICOS</b>	<b>COMPOSIÇÃO QUÍMICA ANALISADA REGIÃO 3</b>
C	0,07
Mn	1,38
Si	0,21
P	0,022
S	0,013
Cr	0,08
Ni	0,05
Mo	0,36

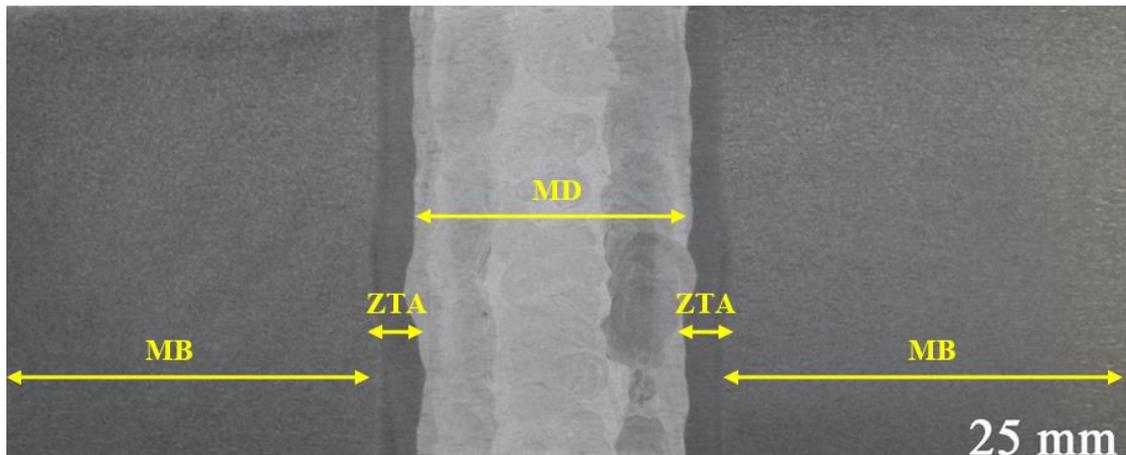
Fonte: próprio autor.

Analisando os resultados da composição química do metal de base e do metal depositado, verifica-se que a quantidade de carbono presente no metal depositado (MD = 0,07%) é 87% menor que a quantidade presente no metal de base (MB = 0,55%). A quantidade de carbono no metal depositado, aliado ao grande aporte térmico gerado no procedimento de soldagem, foi determinante para a formação da microestrutura do metal depositado, que foi influenciada pela alta taxa de resfriamento. Contudo, o aumento percentual de 27% na quantidade de manganês presente no metal depositado, contribui com o aumento da dureza e da resistência mecânica. O aumento de 75% de cromo na composição do metal depositado, provoca uma maior resistência a abrasão e também aumento da resistência mecânica. Vale salientar que, conforme mencionado no item 5.2.2, o alto valor do carbono influencia diretamente a soldabilidade dos aços, sendo que, quanto maior a quantidade de carbono presente na estrutura, mais difícil a realização da solda.

### 5.4.3 Resultados da macrografia longitudinal

A FIG 5.30 apresenta o aspecto macroestrutural da solda, quando foi utilizado o processo de soldagem SMAW.

Figura 5.30 – Aspecto macroestrutural do processo SMAW soldado com Aço DIN 536 S700



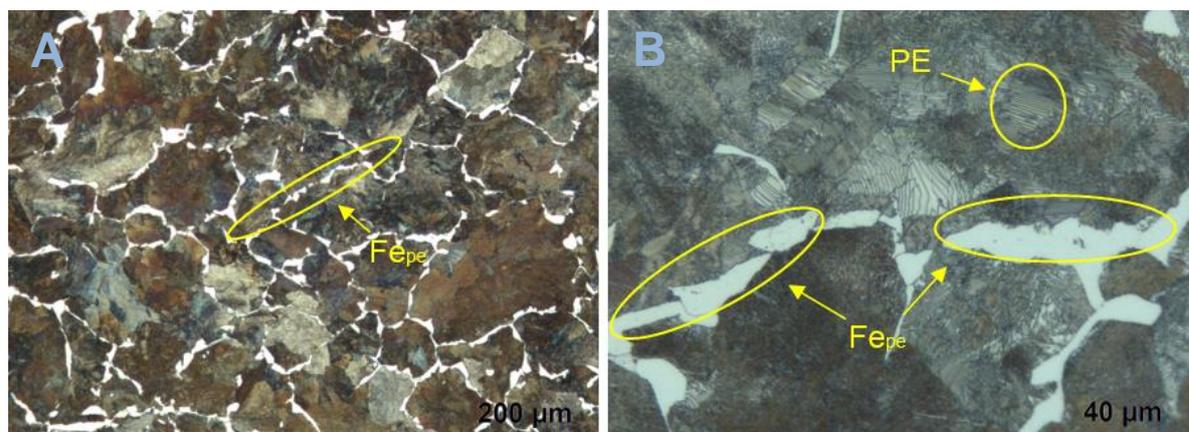
MB: Metal de base  
MD: Metal depositado  
ZTA: Zona termicamente afetada  
Fonte: próprio autor.

### 5.4.4 Resultado da Microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura (MEV)

#### ✓ Metal de base

Após preparação da amostra para realização da micrografia, ficou evidenciado que a microestrutura do metal de base é formada por perlita e ferrita proeutetóide, conforme evidenciado nas FIGs 5.31A e 5.31B.

**Figura 5.31 – Aspecto microestrutural do metal de base trilho A100 soldado com Aço DIN 536 S700 com aumentos de 100(FIG.A) e 500(FIG.B) vezes.**



PE: Perlita

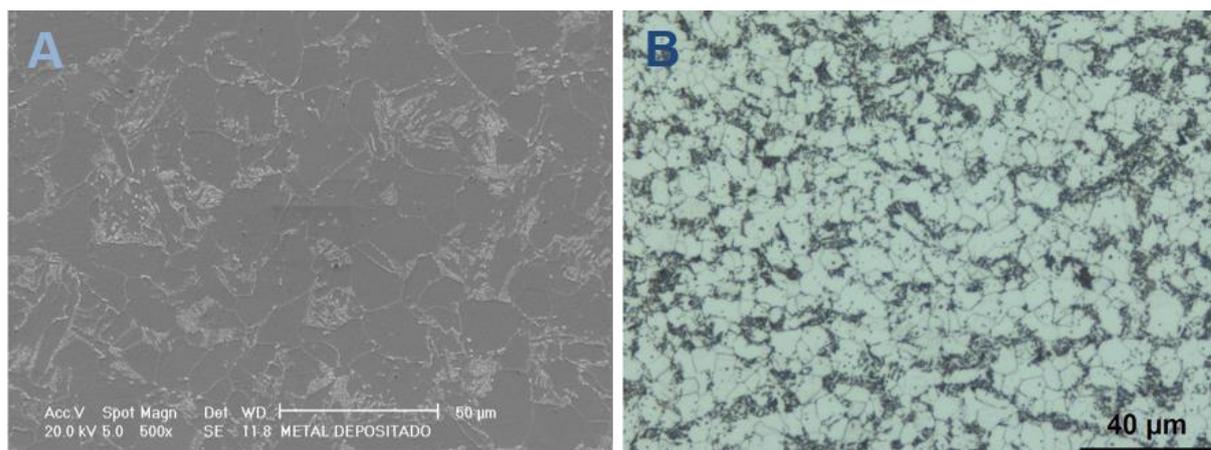
Fe<sub>pe</sub>: Ferrita proeutetóide

Fonte: próprio autor.

### ✓ Metal depositado

Na região do metal depositado, a estrutura do material é constituída por uma matriz ferrítica com possível ocorrência cementita nos contornos de grão e ferrita acicular. As FIGs. 5.32A e 5.32B apresentam a microestrutura do metal depositado.

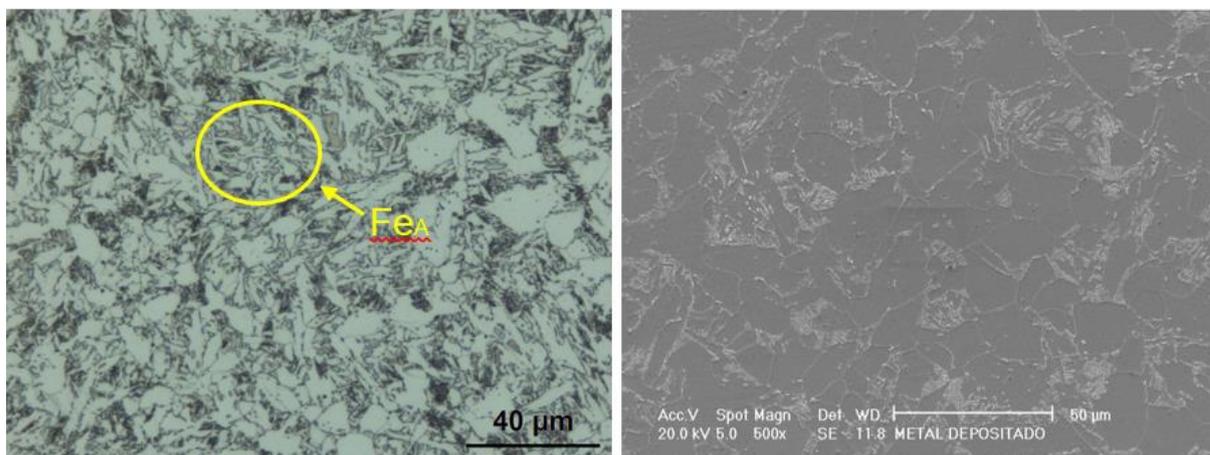
**Figura 5.32 - Aspecto microestrutural do metal depositado soldado através do processo SMAW Aço DIN 536 S700 com aumentos de 500 vezes.**



Fonte: próprio autor.

As FIGs 5.33A e 5.33B evidenciam a provável presença ferrita acicular no metal depositado.

**Figura 5.33 - Aspecto microestrutural do metal depositado soldado através do processo SMAW soldado com Aço DIN 536 S700 com aumentos de 500 vezes.**

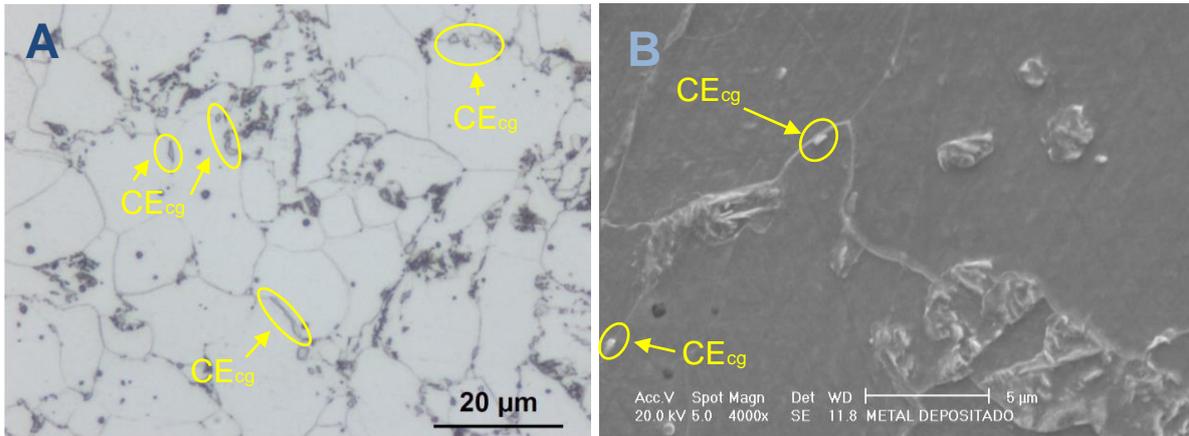


FeA: Ferrita Acicular  
Fonte: Próprio autor.

A ferrita acicular é constituída de placas laterais de ferrita, que precipitam e crescem diretamente de um contorno de grão da austenita. Esta estrutura é favorecida por um maior tamanho de grão da austenita, por teores de carbono intermediários (entre 0,2 e 0,4%) e principalmente por um super resfriamento. Grãos relativamente grosseiros são formados e apresentam pequena diferença quanto a orientação cristalográfica. Estas características e a presença de constituintes ricos em carbono em seus contornos, fazem com que esta forma de ferrita seja indesejada em soldas que necessitam apresentar elevada tenacidade. Devido ao super resfriamento necessário para formação da ferrita acicular ser baixo, a formação de microfases de austenita retida, martensita ou agregados de ferrita e carboneto (perlita) podem ocorrer entre as placas da ferrita em crescimento. (LESSA, 2011)

As FIGs 5.34A e 5.34B evidenciam a presença de cementita metal depositado.

**Figura 5.34 - Aspecto microestrutural do metal depositado soldado através do processo SMAW soldado com Aço DIN 536 S700 com aumentos de 500(FIG.A) e 1000(FIG.B) vezes.**



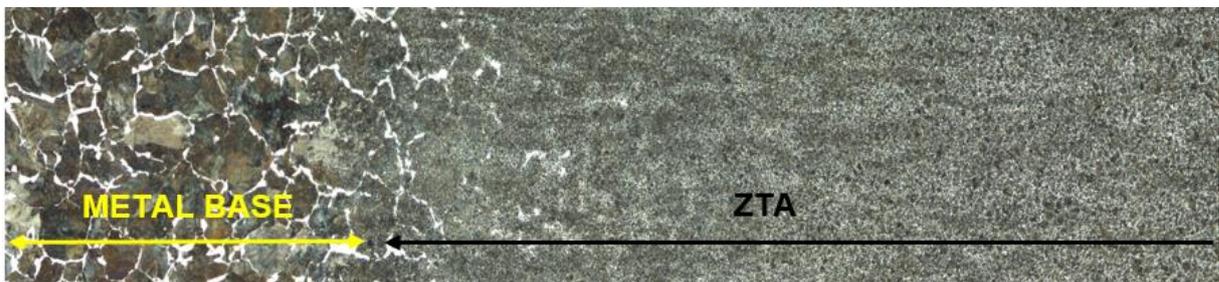
CEcg: Cementita no contorno de grão

Fonte: Próprio autor.

#### ✓ Zona termicamente afetada

Na zona termicamente afetada, foram encontradas duas regiões com duas estruturas distintas. Na região da ZTA próximo a transição com o metal de base, foram encontradas ferrita, perlita e grãos recristalizados de perlita. Na região da ZTA próximo a transição com metal depositado, foi observado perlita recristalizada e ferrita proeutetóide. As FIGs. 5.35 e 5.36 apresentam a microestrutura das regiões encontradas nas transições com a ZTA.

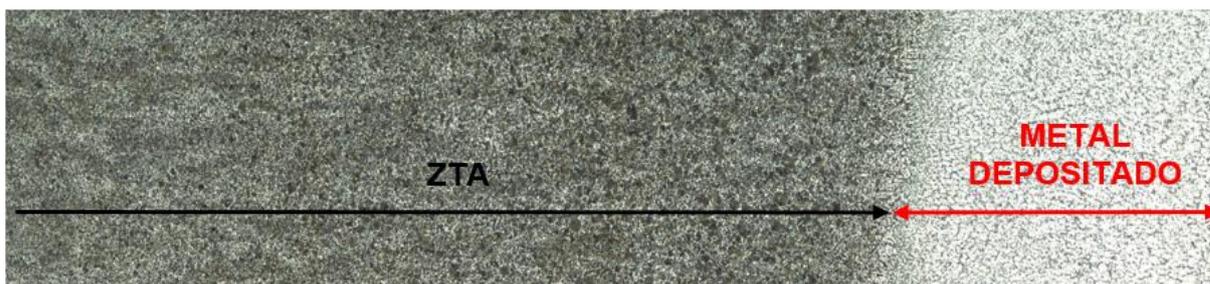
**Figura 5.35 - Microestrutura na ZTA no processo de soldagem SMAW com Aço DIN 536 S700**



ZTA: Zona termicamente afetada

Fonte: Próprio autor.

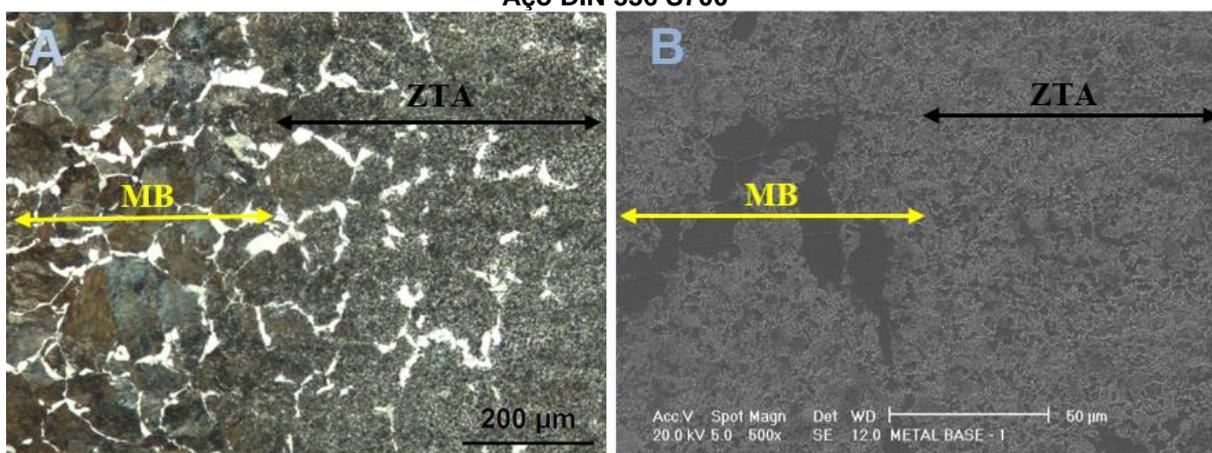
**Figura 5.36 - Microestrutura na ZTA no processo de soldagem SMAW Aço DIN 536 S700**



ZTA: Zona termicamente afetada  
 Fonte: próprio autor.

As FIGs 5.37A e 5.37B apresentam a microestrutura na zona de transição entre o metal de base e a ZTA, onde podem ser observadas a presença de ferrita, perlita e perlita recristalizada.

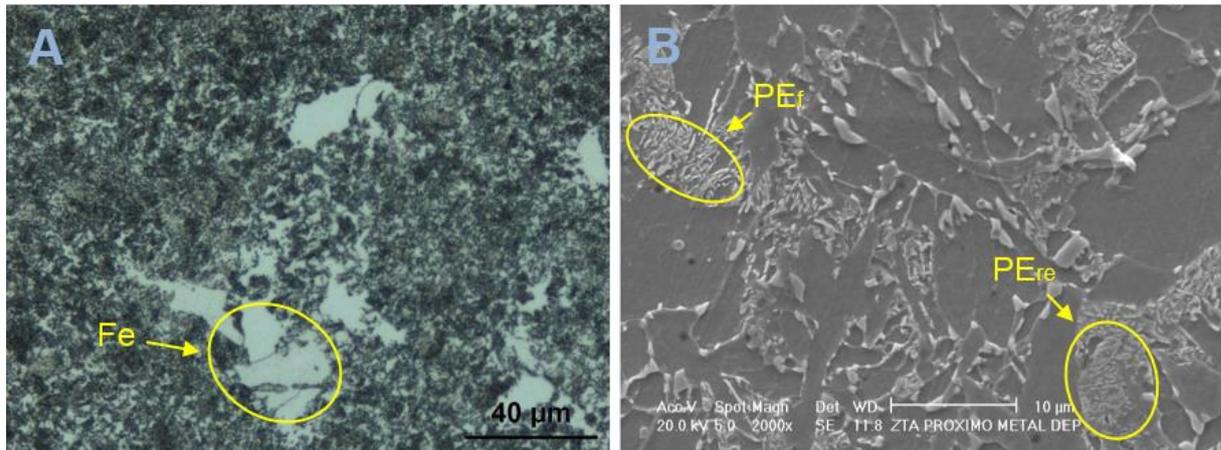
**Figura 5.37 - Microestrutura na transição metal de base e ZTA no processo de soldagem SMAW Aço DIN 536 S700**



MB: Metal de base  
 ZTA: Zona termicamente afetada  
 Fonte: Próprio autor.

As FIGs 5.38A e 5.38B apresentam a microestrutura na ZTA próximo ao metal depositado, onde podem ser observadas ferrita, perlita e perlita recristalizada.

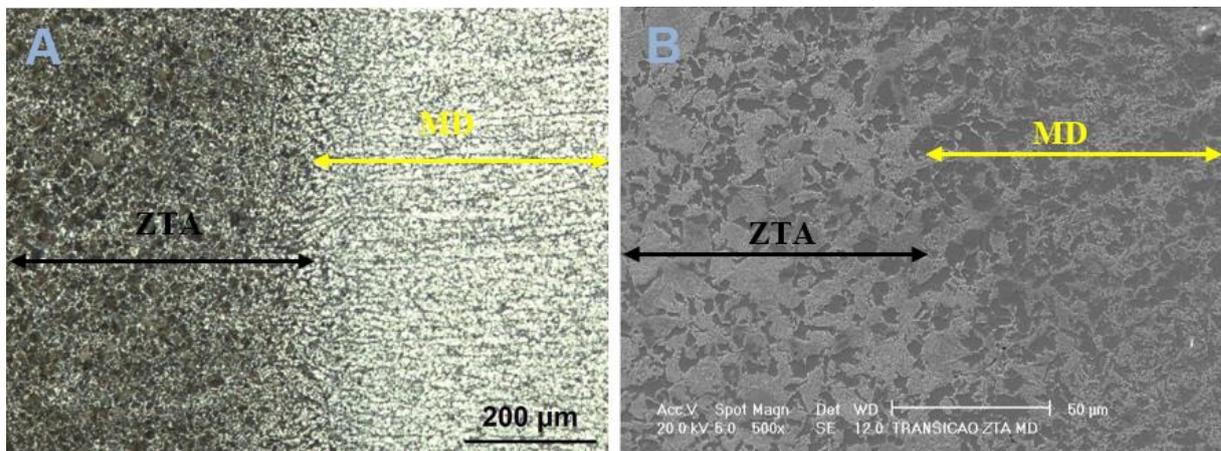
**Figura 5.38 - Microestrutura na transição ZTA com metal de base no processo de soldagem SMAW Aço DIN 536 S700.**



PE<sub>f</sub>: Perlita fina  
 PE<sub>re</sub>: Perlita recristalizada  
 Fe: Ferrita  
 Fonte: Próprio autor.

As FIGs 5.39A e 5.39B apresentam a microestrutura na zona de transição entre ZTA e metal depositado, onde podem ser observadas a presença perlita recristalizada e ferrita.

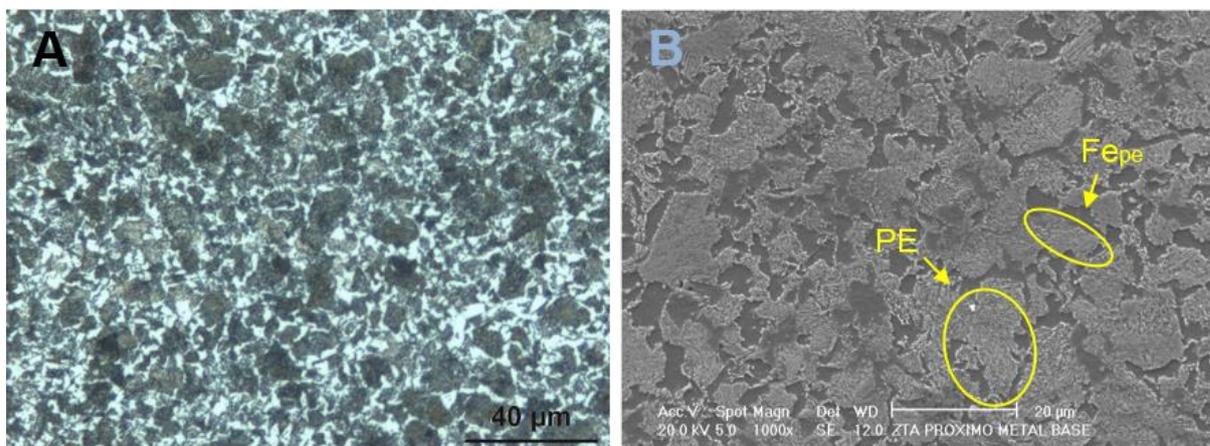
**Figura 5.39 - Microestrutura na transição da ZTA com metal de base no processo de soldagem SMAW Aço DIN 536 S700**



Fonte: Próprio autor.

As FIGs. 5.40A e 5.40B apresentam a microestrutura presente no centro da ZTA. Fica evidenciado a presença de ferrita e perlita.

**Figura 5.40 - Microestrutura na transição da ZTA com metal de base no processo de soldagem SMAW Aço DIN 536 S700**



Fe<sub>pe</sub>: Ferrita proeutetóide

PE: Perlita

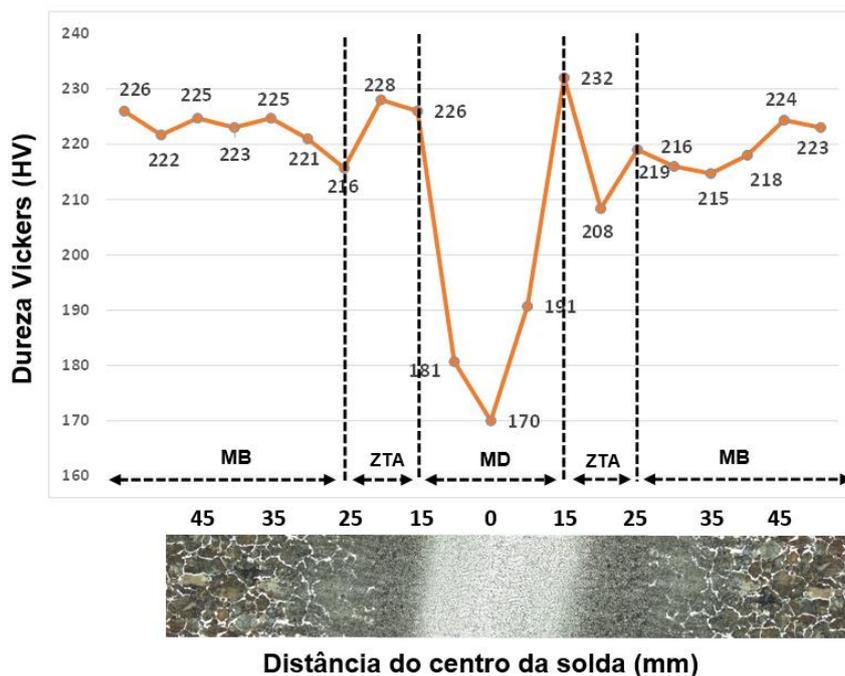
Fonte: Próprio autor.

#### 5.4.5 Dureza Vickers

A formação da microestrutura e conseqüentemente a variação da dureza nas regiões de uma junta soldada estão ligadas a três fatores que estão descritos no item 5.2.5.

As variações de dureza ao longo do perfil soldado são observadas na FIG. 5.41. O perfil de dureza do trilho soldado apresentou homogeneidade, possuindo dureza máxima (232 HV) na ZTA e dureza mínima (170 HV) no metal depositado. No ponto de maior dureza, foi observada a presença de ferrita, perlita e grãos recristalizados de perlita. No ponto de menor dureza, pôde ser observada a presença de uma matriz ferrítica com possível ocorrência cementita nos contornos dos grãos.

**Figura 5.41 – Perfil de dureza transversal ao longo do perfil soldado através do processo SMAW com Aço DIN 536 S700**



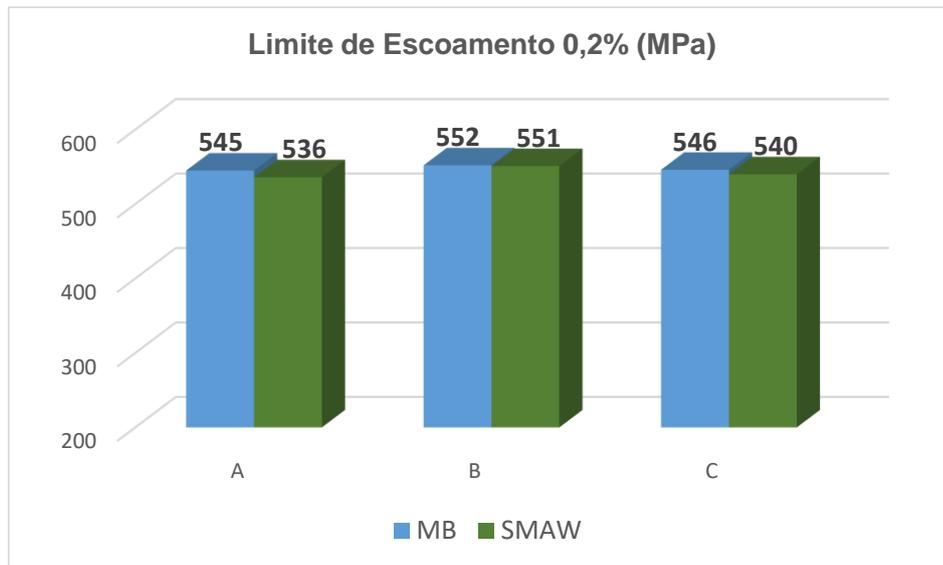
MB: Metal de base  
 MD: Metal depositado  
 ZTA: Zona termicamente afetada  
 Fonte: próprio autor.

#### 5.4.6 Tração

O ensaio de tração foi realizado conforme metodologia apresentada no item 4.4.4. Durante a realização deste ensaio, foi observado que a ruptura dos corpos de prova ocorreu preferencialmente na ZTA.

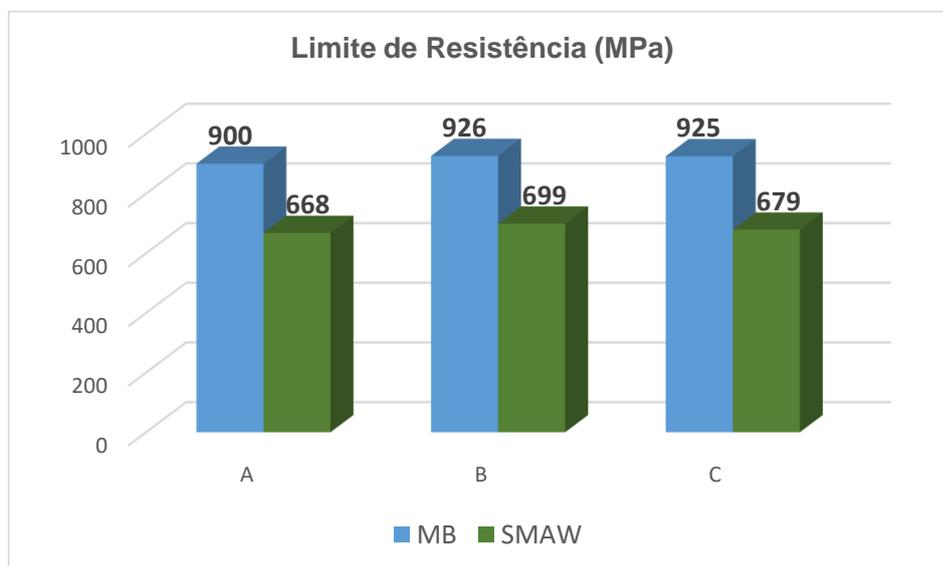
No ponto de ruptura dos corpos de prova, foi observado valor de dureza máximo de 232 HV. O aumento da dureza geralmente está aliado a perda de ductilidade, acarretado na fragilização do material. As FIGs 5.42, 5.43 e 5.44 apresentam os resultados de tração do corpo de prova proveniente do metal de base e do corpo de prova oriundo do processo de soldagem SMAW.

**Figura 5.42 - Limite de escoamento metal de base e trilho soldado processo SMAW com Aço DIN 536 S700**



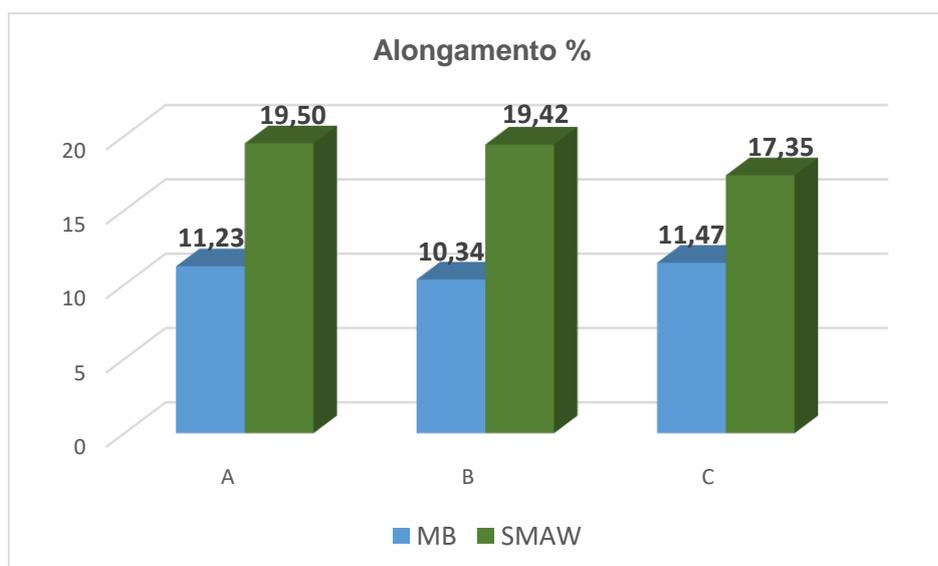
MB: Metal de base  
TW: Soldagem aluminotérmica  
Fonte: próprio autor

**Figura 5.43 - Limite de escoamento metal de base e trilho soldado processo SMAW com Aço DIN 536 S700**



MB: Metal de base  
TW: Soldagem aluminotérmica  
Fonte: próprio autor

**Figura 5.44 - Alongamento percentual metal de base e trilho soldado processo SMAW com Aço DIN 536 S700**



MB: Metal de base  
 TW: Soldagem aluminotérmica  
 Fonte: próprio autor

O metal de base possui um limite de escoamento máximo de 552 MPa, contra um valor máximo de 551 MPa do material soldado através do processo SMAW, uma diferença percentual de 2%. O limite de resistência máximo do metal de base, 926 MPa é 25% maior que o limite de resistência máximo do metal soldado, 699 MPa. A diferença no alongamento é de 41%, possuindo seu valor máximo no metal soldado, 19,50, contra 11,47 no metal de base.

## 5.5 ANÁLISE COMPARATIVA

Os metais de base utilizados neste trabalho possuem microestruturas distintas. A microestrutura do trilho DIN 536-S700 é formada por perlita e ferrita proeutetóide. A estrutura do trilho DIN 536-S900 é completamente perlítica.

O trilho DIN 536-S700 possui em média, dureza 20% menor que o trilho DIN 536-S900. A diferença na dureza é proporcionada principalmente pela variação de carbono

entre os metais de base, 23%, e pela variação de manganês nas composições dos dois, que é 17% maior no metal de base DIN 536-S900.

O metal de base DIN 536-S700 possui limites de escoamento e resistência menores que o metal de base DIN 536-S900.

O metal depositado do trilho DIN 536-S700, soldado através do processo SMAW a microestrutura é provavelmente composta por cementita nos contornos dos grãos e ferrita acicular, próximo a transição com metal de base, foram encontradas ferrita, perlita e grãos recristalizados de perlita. Na ZTA próximo a com metal depositado, foi encontrado perlita recristalizada e ferrita.

O metal depositado do trilho DIN 536-S900, soldado através do processo SMAW, possui microestrutura constituída por uma matriz ferrítica. Na ZTA próximo a transição com o metal de base, foi encontrada estrutura perlítica com ferrita proeutetóide e perlita. Na ZTA próximo a transição com metal depositado, foi observado perlita recristalizada com ferrita proeutetóide no contorno dos grãos.

O metal depositado do trilho DIN 536 s900, soldado através do processo TW possui microestrutura constituída por perlita e ferrita proeutetóide. Na ZTA, próximo a transição com o metal de base, foi encontrada perlita. Na região da ZTA próximo a transição com metal depositado, foi encontrada perlita e ferrita.

O resfriamento do metal soldado através do processo TW realizado durante um período dentro do refratário, contribuiu para a formação da microestrutura perlítica e ferrítica, uma vez que, este acontece de forma lenta e controlada.

## 6. CONCLUSÃO

Através dos resultados obtidos e com base nas discussões feitas, pôde-se estabelecer que para a aplicação requerida neste trabalho, pontes rolantes de grande porte (capacidade de carga de 300 toneladas), o processo de soldagem mais eficiente é o TW utilizando o trilho DIN 536-S900, que alia microestrutura perlítica e ferrítica no metal depositado. A aplicação em questão requer alta resistência mecânica, tenacidade de resistência ao desgaste, características estas fornecidas por estas microestruturas. Os trilhos DIN 536-S700 e DIN 536-S900 soldados utilizando o processo SMAW apresentaram elevada dureza e resistência ao desgaste, contudo, possuem uma matriz frágil em relação ao trilho DIN 536-S900 soldado através do processo TW. Em decorrência disso, o processo SMAW utilizando o consumível E 9018D1 aplicado na união de trilhos DIN536-S700 e DIN536-S900 não é aconselhável, uma vez que, poderão apresentar falhas prematuras em decorrência das condições severas de operação das pontes rolantes, como grande vibração.

## 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- ✓ Realizar soldagem nos trilhos variando a inclinação do chanfro.
- ✓ Realizar soldagem SMAW utilizando consumível com composição química semelhante ao metal de base.
- ✓ Utilizar temperatura de pré-aquecimento no processo TW proveniente do cálculo de carbono equivalente.
- ✓ Realizar soldas nos trilhos A100 DIN 536-S700 utilizando o processo TW.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGLAN, H.A. **Mechanical and fracture behavior of bainitic rail steel**. Journal of Materials Processing Technology, Volume 151, Issues 1-3, 1 September 2004, pp. 268-274. ANTF, **Associação Nacional de Transporte Ferroviário** <http://www.antf.org.br>. Acesso em 16/07/2007.

ANDREWS, J. B. **Analysis of Thermal Stress and Metal Movement During Welding**, NASA Contractor Report, NASA, 1970.

ASTM – **American Society for Testing Materials**. Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. ASTM A 370, 2011.

AWS – **American Welding Society**. Recommended Practices for the Welding of Rails and Related Rail Components for Use by Rail Vehicles. Miami: AWS D.15.2-94, 2003.

BLUNT, J.; BALCHIN, N. C. **Health and Safety in Welding and Allied Processes**, 5th Edition, 2002.

COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderurgicos Comuns**. 4ª ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008.

DIN - **Deutsches Institut für Normung**, Crane Rails. DIN 536, 1991.

FORTES, C. **Apostila de Eletrodos Revestidos**. Belo Horizonte, Minas Gerais: ESAB. 2005

IIW - **International Institute of Welding**. Recommendation for the use of the implant test as a complementary information test on susceptibility to cold cracking in the welding of steels. 1994

JEFFUS, L. **Welding - Principles and Applications**, 7th Edition, 2012

HIEBBELER, R.C. **Resistência dos Materiais**. 5ª ed, 2008.

KASUYA, T.; HASHIBA, Y.; OHKITA, S., AND FUJI, M. **Heat Conduction Analysis of Bidirectional Multipass Welding with Short Bead Lengths**. Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 5, 2000.

LEAL, S.V., FIGUEIREDO, M.K., **Soldagem Aluminotérmica**. Centro Federal de Educação Tecnológica do Maranhão – CEFET - Departamento de Mecânica e Materiais São Luiz, 2006.

LENZANDRELLENZ, A. L., **Tecnologia de Automação de Pontes Rolantes**. Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – SENAI. Departamento de Automação. Mias Gerais, 2012.

LIMA JÚNIOR, D. R. **Caracterização Microestrutural e Mecânica de Juntas Soldadas Utilizando os Processos GTAW, FCAW e SMAW**. Dissertação. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

LINNERT, G.E. **Welding Metallurgy**, American Welding Society, Nova York, 1990

MACHADO, I.G., KISS, J.F. **Mecanismo e natureza das trincas de solidificação nas soldas**. Tecnologia de Soldagem, Associação Brasileira de Soldagem, São Paulo, 1980.

MARICH, **Major Advances in Rail Technologies Achieved in the Past 10-20 Years**. Pp. 485-497, 1994.

MARQUES, P. V. MODENESI, P.J. BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3.ed. Editora UFMG: Belo Horizonte, 2011.

MARQUEZE, C. M. e QUITES, A. M. **Descontinuidades em Soldas**. Apostila. 1ª ed. Florianópolis, 1995.

MODENESI, P. J. **Apostila – Efeitos Mecânicos do Ciclo Térmico**, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2001.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. dos. - **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. dos. **Curso de Metalurgia de Soldagem**. Universidade Federal de Minas Gerais: DEM, Belo Horizonte - MG, 1985.

MONDENESI, P. J. **Soldabilidade dos Aços Transformáveis**, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2010

MYERS, J. **Structure and Properties of Thermite Welds in Rails**. Welding Journal, 1982.

O'BRIEN, R. L. **Thermit Welding**, Canada, 1991

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

PORTO, T. G. **PTR 2501 – Ferrovias**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.

RODRIGUES, E. R. **Influência de parâmetros do processo FCAW.G nas características da solda do aço ASTM A-36**. Dissertação. Universidade Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2010.

ROLDÓ, L. **Análise de Tensões Residuais em Trilhos Ferroviários**. Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1998.

ROSA, J. S. C. **Avaliação de Solda Aluminotérmica em Ângulo**. Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008

SARTORI, M. **Caracterização Mecânica e Metalúrgica de Soldas Aluminotérmicas em Trilhos Ferroviários**. Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.

SECCO, M. A. **Soldagem: Processo por Eletrodo Revestido**. Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – SENAI. Curitiba, 2002.

SCHAMBRON, T.; PHILLIPS, A.W.; O'BRIEN, D.M. **Thermomechanical Processing of Pipeline Steels with a Reduced Mn Content**, Vol. 49, 2009.

SCHROEDER, L. C. **Improving the Structure and Properties of Thermite Weld Metal**, University of Arizona, Tucson, 1984.

SHERIDAN, W. D. **Reference Data Sheet for Aluminum**, Meridian One Consulting Engineers, 1996.

(SILVA, 2008).

VAN VLACK, L. H. **Princípios de Ciência dos Materiais**, 5ª Ed. Editora Campus. Rio de Janeiro, 1984.