

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Dissertação de Mestrado

Autor: Fabiano Farias de Oliveira

**“ESTUDO DAS TRANSFORMAÇÕES MACRO E MICROESTRUTURAIS
DAS JUNTAS SOLDADAS DO AÇO SAE - 4340 PELO PROCESSO
FCAW.”**

Belo Horizonte
Novembro de 2015

Fabiano Farias de Oliveira

**“ESTUDO DAS TRANSFORMAÇÕES MACRO E MICROESTRUTURAS
DAS JUNTAS SOLDADAS DO AÇO SAE - 4340 PELO PROCESSO
FCAW.”**

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 obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Prof^a. Maria Celeste Monteiro de Souza Costa, Dra.

Co-orientador: Prof. Wanderley Xavier Pereira, Dr.

Belo Horizonte
Novembro de 2015

Oliveira, Fabiano Farias de.
O48e Estudo das transformações macro e microestruturais das juntas soldadas do Aço SAE – 4340 pelo processo FCAW / Fabiano Farias de Oliveira. - 2015.
96 f. : il.; tabs. ; grafs. –
Orientadora: Maria Celeste Monteiro de Souza Costa.
Co-orientador: Wanderley Xavier Pereira.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2015

Bibliografia.
1. Soldagem. 2. Aço (tratamento térmico). 3. Microestrutura. I. Costa, Maria Celeste Monteiro de Souza. II. Pereira, Wanderley Xavier. 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

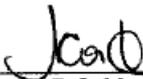
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

*“ESTUDO DAS TRANSFORMAÇÕES MACRO E MICROESTRUTURAIS
DAS JUNTAS SOLDADOS DO AÇO SAE 4340 PELO PROCESSO FCAW.”*

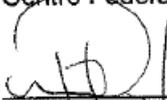
Autor: Fabiano Farias de Oliveira

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Maria Celeste Monteiro de Souza Costa

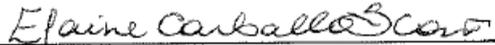
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



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



Prof. Dr. Wanderley Xavier Pereira (CO-ORIENTADOR)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG



Prof^ª. Dr^ª. Elaine Carballo Siqueira Corrêa
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG



Prof. Dr. Carlos Alberto Carvalho Castro
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Belo Horizonte, 04 de Novembro de 2015.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu saudoso pai, que infelizmente não se encontra mais neste mundo, e à minha querida mãe, que sempre me motivaram e acreditaram que um dia eu pudesse concretizar os meus sonhos. A eles, minha eterna gratidão, amor e respeito.

AGRADECIMENTOS

A professora, Maria Celeste Monteiro de Souza Costa (orientadora) e ao professor Wanderley Xavier Pereira (co-orientador), pela amizade, carinho, paciência e dedicação e por terem acreditado na concretização deste trabalho.

Meus sinceros agradecimentos ao professor Dr. Carlos Alberto Carvalho Castro, pela sua amizade, colaboração, suporte e inúmeras sugestões, principalmente no auxílio na execução da soldagem dos corpos de prova.

Ao Sr. Eduardo Pereira da Silva (Responsável Técnico do Laboratório de Mecânica – CEFET-MG, Campus VII – Varginha-MG) pela sua grande ajuda e dedicação na preparação e soldagem dos corpos de prova.

À ESAB, pela doação do material de solda utilizado nesse trabalho.

Aos alunos de graduação Robson de Carvalho Marins e Luiz Fernando Miranda do curso de Engenharia Mecânica (UNIS-MG) pelas valiosas ajudas na preparação dos corpos de prova.

A minha esposa e filho o meu carinho, pela sua paciência e tolerância, principalmente nos momentos difíceis e diante dos momentos de ausência, devido as inúmeras viagens.

Ao grupo UNIS-MG, pelo apoio, incentivo e por ter acreditado na conclusão deste trabalho, em especial aos professores Nilton dos Santos Portugal e Luiz Carlos Vieira Guedes, meus sinceros agradecimentos.

Aos meus amigos e familiares que sempre me motivaram e me apoiaram nesta jornada.

E principalmente a DEUS, pela saúde, coragem e fé, diante das dificuldades encontradas durante a concretização deste trabalho.

RESUMO

O processo de soldagem com arame tubular (FCAW) vem ganhando espaço no mercado, principalmente devido a sua alta produtividade, pois este processo apresenta grande facilidade de ser mecanizado/automatizado. Outra característica importante que destaca neste processo é a possibilidade de soldar a maioria dos metais. Esta facilidade se dá em função da liberdade de produzir arames com composições químicas bem específicas. Porém, na soldagem de aços temperáveis tem-se um grande desafio que é o controle da microestrutura gerada pelos diferentes ciclos térmicos gerados durante a soldagem. Em função desta particularidade e por haver poucos estudos nesta área, o objetivo deste trabalho é analisar os efeitos térmicos do processo de soldagem FCAW, nas propriedades metalúrgicas e geométricas da região soldada para o aço transformável SAE4340. Para o desenvolvimento deste trabalho foi considerado como variáveis de controle, a corrente de soldagem; a tensão de soldagem; os tratamentos de pré e pós-aquecimento e a peça sem tratamento. A finalidade do estudo dos parâmetros de controle é apontar as melhores condições experimentais que proporcionam uma zona termicamente afetada (ZTA) com menor percentual de fases duras como bainita e a martensita, além de promover uma boa geométrica do cordão de solda que garantam as propriedades mecânicas. Os resultados deste trabalho mostraram que as soldas executadas com correntes mais elevadas e nas condições de pré e pós-aquecimento apresentaram condições mais favoráveis em relação aos aspectos geométricos do cordão, como: penetração, reforço, diluição e principalmente evitou a formação de partículas duras, como a martensita e bainita.

Palavras chave: FCAW. SAE4340. Microestrutura. ZTA.

ABSTRACT

The welding process with tubular wire (FCAW) has gained space in the Market, mainly due to its high productivity because such a process presents great facility to be mechanized/automated. Another important feature in this process is the possibility of welding the majority of metals. This facility is due to the fact that it is possible to produce wires with chemical compositions very well specified. Nevertheless, in the welding process of hardenable steels there is a great challenge in controlling the microstructure generated during the different thermal cycles. In function of this particularity and because there are a few studies in this area, the objective of this study is to analyze the thermal effects in the FCAW welding process in the metallurgical and geometrical properties of the welded region for the transformable steel 4340. For the development of this study, the principal variables considered were the current and the tension of the arc, with and without pre and post annealing. The target of this control is to point out the best experimental conditions that would lead to a heat affected zone (ZAT) with less percentage of hard phases such as bainite and martensite, besides promoting a good geometry of the weld beam, in order to grant good mechanical properties. The results of this study demonstrate that the weld executed with higher current values and in the conditions of pre and post-welding presented more favorable conditions relating to the geometric aspects of the weld beam such as penetration, reinforcement, dilution and mainly avoided the formation of hard particles such as martensite and bainite.

Keywords: FCAW. SAE4340. Microstructure. ZTA.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Representação esquemática para o processo FCAW.....	19
Figura 3.2 - Seção transversal de um arame tubular autoprotégido.....	22
Figura 3.3 - Representação esquemática da soldagem com arame tubular com proteção externa.....	23
Figura 3.4 - Representação esquemática da soldagem com arame tubular sem proteção externa.....	24
Figura 3.5 - Condutividade térmica dos gases de soldagem.....	25
Figura 3.6 - Perfis de penetração e de transferência típicos em soldagem GMAW com alguns gases de proteção.....	28
Figura 3.7- Representação esquemática das regiões de uma soldagem (a) representação esquemática do tamanho de grão de cada região (b).....	30
Figura 3.8 - Crescimento na interface sólido/líquido.....	31
Figura 3.9- Representação esquemática do crescimento de grãos na zona fundida.....	32
Figura 3.10 - Crescimento epitaxial entre os cordões de solda.....	33
Figura 3.11 - Perfil térmico obtido após o processo de soldagem por fusão.....	34
Figura 3.12 - Análise metalográfica da solda, na região do metal de adição, conformação de ferrita acicular.....	35
Figura 3.13 - Representação esquemática das zonas de uma solda com passe único.....	36
Figura 3.14 - Representação esquemática das regiões de superposições de ZACs.....	38
Figura 3.15 - Representação esquemática do princípio de funcionamento da agitação mecânica por eletromagnetismo.....	38
Figura 3.16 - Representação esquemática das faixas de temperatura indicada para a austenitização no recozimento.....	41
Figura 3.17 - Representação esquemática do diagrama TRC para duas curvas de resfriamento.....	43
Figura 3.18 - Micrografia mostrando as microestruturas do metal de solda.....	45

Figura 3.19 - Micrografia das microestruturas de ferrita e perlita na ZTA.....	46
Figura 4.1 - Representação esquemática do Fluxograma experimental.....	48
Figura 4.2 - Representação esquemática da preparação da chapa forjada do aço SAE 4340.....	51
Figura 4.3 - Representação esquemática das disposições dos corpos de prova para soldagem cortados).....	52
Figura 4.4 - Posições das medições de dureza realizados nos copos de prova após tratamento térmico de normalização, confecção e limpeza do corpo de prova.....	53
Figura 4.5 - Bancada de testes.....	54
Figura 4.6 - Imagens, como exemplo, da etapa inicial de preparação de amostras para caracterização macro e microestrutural do cordão de solda.....	59
Figura 4.7 - Representação esquemática dos parâmetros geométricos considerados para análise dos cordões de solda.....	59
Figura 4.8 - Representação esquemática do procedimento e localização das impressões para a obtenção da distribuição da microdureza no aço SAE 4340 após a soldagem.....	61
Figura 5.1 - Corpos de prova aço SAE 4340 após a soldagem das oito condições (sem a réplica).....	63
Figura 5.2 - Macrografias dos cordões de solda com as suas respectivas dimensões e áreas - Condições 1 e 5: Soldagem normal (sem pré e sem pós aquecimento).....	64
Figura 5.3 - Macrografias dos cordões de solda com as suas respectivas dimensões e áreas - Condições 2 e 6: Soldagem com pós-aquecimento.....	65
Figura 5.4 - Macrografias dos cordões de solda com as suas respectivas dimensões e áreas - Condições 3 e 7: Soldagem com pré-aquecimento.....	66
Figura 5.5 - Macrografias dos cordões de solda com as suas respectivas dimensões e áreas - Condições 4 e 8: Soldagem normal com pré e sem pós-aquecimento.....	67
Figura 5.6 - Influência do fator corrente nas formações das dimensões dos cordões de solda.....	70
Figura 5.7 - Influência do fator corrente nas formações das áreas dos Cordões de solda.....	71

Figura 5.8 - Influência do fator pré-aquecimento nas formações das dimensões geométricas dos cordões de solda.....	71
Figura 5.9 - Influência do fator pré-aquecimento nas formações das áreas dos cordões de solda.....	72
Figura 5.10 - Influência do fator pós-aquecimento nas formações das áreas dos cordões de solda.....	72
Figura 5.11- Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados na condição 1 (corrente de 250 A) e condição 5 (corrente de 290 A).....	76
Figura 5.12 - Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados na condição 2 (corrente de 250 A) e condição 6 (corrente de 290 A).....	76
Figura 5.13 - Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados na condição 3 (corrente de 250 A) e condição 7 (corrente de 290 A).....	77
Figura 5.14 - Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados na condição 4 (corrente de 250 A) e condição 8 (corrente de 290 A).....	78
Figura 5.15 - Valores de microdureza para todas as condições experimentais.....	79
Figura 5.16 - Micrografias do aço SAE 4340 nas áreas: zona fundida, termicamente afetada e metal de base - corpo de prova soldado na condição 1.....	80
Figura 5.17 - Micrografias do aço SAE 4340 nas áreas: zona fundida, termicamente afetada e metal de base - corpo de prova soldado na condição 4.....	81
Figura 5.18 - Micrografias do aço SAE 4340 nas áreas: zona fundida, termicamente afetada e metal de base - corpo de prova soldado na condição 5.....	82
Figura 5.19 - Micrografias do aço SAE 4340 nas áreas: zona fundida, termicamente afetada e metal de base - corpo de prova soldado na condição 8.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Gases de proteção e suas propriedades fundamentais.....	26
Tabela 3.2 - Classificação de microestrutura de metal de solda de baixo carbono.....	44
Tabela 4.1 - Composição química (% em peso) do aço SAE 4340.....	49
Tabela 4.2 - Composição química especificada do arame (%).....	50
Tabela 4.3 - Propriedades mecânicas do arame.....	50
Tabela 4.4 - Parâmetros utilizados nos testes iniciais realizados com o Consumível ASME SFA 5.29 em chapas de aço carbono ASTM A-36.....	56
Tabela 4.5 - Parâmetros utilizados nos testes iniciais realizados com o consumível ASME SFA 5.29 em chapas de aço SAE 4340, com e sem pré-quecimento.....	56
Tabela 4.6 - Variáveis de entrada com seus respectivos níveis para o eletrodo básico (planejamento fatorial 2^3 com + 1 repetição) - 16 corpos de prova.....	57
Tabela 4.7 - Matriz da Experimentação.....	58
Tabela 4.8 - Reagentes químicos utilizados na caracterização macrográfica e micrográfica das amostras.....	60
Tabela 5.1 - Resultados dos ensaios de dureza (médias).....	62
Tabela 5.2 - Variáveis de entrada e resultados dos valores geométricos dos cordões de solda (ZTA e ZF - Condição e réplica).....	68
Tabela 5.3 - Variáveis de entrada e resultados dos valores geométricos dos cordões de solda (média - Condição e réplica).....	69
Tabela 5.4 - Estimativas dos efeitos e coeficientes dos fatores nas respostas analisadas.....	69
Tabela 5.5 - Valores médios obtidos (condição e réplica) das dimensões dos cordões para cálculo da diluição.....	73
Tabela 5.6 - Diluições típicas por processos de soldagem.....	74

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A	- Ampère
A ₁	- Zona austenítica
A _d	- Área depositada
AF	- Ferrita acicular
A _p	- Área de penetração
A _{Total}	- Área total
A _{ZTA}	- Área zona termicamente afetada
bt	- Base térmica
CA	- Corrente Alternada
CC(-)	- Corrente Contínua e polaridade negativa ou eletrodo ligado ao polo negativo
CC(+)	- Corrente Contínua e polaridade inversa ou corrente contínua e polaridade positiva
CCC	- Estrutura cúbica de corpo centrada
CFC	- Estrutura cúbica de face centrada
CP	- Corpo de prova
FCAW	- Processo de soldagem a arco com arame tubular
GMAW	- Processo de soldagem a arco com arame sólido e proteção gasosa (MIG/MAG)
h	- Reforço
HB	- Dureza Brinell
HC	- Estrutura hexagonal compacta
HRB	- Dureza Rockwell-B
HRC	- Dureza Rockwell-C
HV	- Dureza Vickers
FC	- Ferrita com segunda fase com agregado de ferrita com carbeto
PF (G)	- Ferrita de contorno de grão
PF (I)	- Ferrita intragranular poligonal
FS (A)	- Ferrita com segunda fase alinhada

FS (NA)	- Ferrita com segunda fase não alinhada
I	- Corrente
I _b	- Corrente de fundo ou de base
I _{mbt}	- Corrente média de base térmica
I _{mpt}	- Corrente média de pulso térmico
I _p	- Corrente de pico (I _p),
IIW	- Instituto Internacional de soldagem
M	- Martensita
MAG	- Soldagem com eletrodo consumível e proteção gasosa ativa no processo GMAW
MB	- Metal de Base
MEV	- Microscópio de Varredura Eletrônica
MIG	- Soldagem com eletrodo consumível e proteção gasosa inerte no processo GMAW
P _{máx}	- Penetração máxima
pt	- Pulso térmico
SMAW	- Processo de soldagem manual com eletrodo revestido
T _{bt}	- Tempo de base térmica
TP	- Temperaturas de pico
t _{pt}	- Tempo de pulso térmico
TRC	- Transformação com resfriamento contínuo
TTPS	- Tratamentos térmicos pós-soldagem
W	- Largura
ZAC	- Zona afetada pelo calor
ZAC-GF	- Zona afetada pelo calor de grãos finos
ZAC-GG	- Zona afetada pelo calor de grãos grossos
ZAC-IC	- Zona afetada pelo calor intercrítica
ZAC-SC	- Zona afetada pelo calor subcrítica
ZF	- Zona Fundida
ZL	- Zona de ligação
ZTA	- Zona termicamente afetada
ΔT	- Representa a temperatura de resfriamento

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
2. OBJETIVOS DA PESQUISA.....	17
2.1. Objetivo Geral.....	17
2.2. Objetivos Específicos.....	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1. Soldagem a arco elétrico com arame tubular (FCAW).....	18
3.2. Tipos de arames tubulares.....	21
3.2.1. Arames tubulares com fluxo metálico em seu interior.....	22
3.2.2. Arames tubulares com fluxo no seu interior capaz de gerar gás de proteção.....	23
3.3. Gases de proteção e suas características.....	24
3.3.1. Gases de proteção para soldagem FCAW.....	26
3.4. Metalurgia da soldagem.....	28
3.4.1. Regiões da junta soldada.....	29
3.5. Tratamentos térmicos.....	34
3.5.1. Pré-aquecimento antes da soldagem.....	35
3.5.2. Tratamentos térmicos.....	39
3.5.3. Tipos de tratamentos térmicos.....	39
3.6. Metalografia.....	42
3.6.1. Microestrutura formada nos aços.....	42
3.6.2. Microestrutura formada na Zona Fundida.....	43
3.6.3. Microestrutura formada na Zona Termicamente afetada (ZTA).....	45
3.6.4. Microestrutura formada na Zona de Ligação.....	45
4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL E EQUIPAMENTOS.....	47
4.1. Descrição geral do trabalho.....	47
4.2. Materiais e Consumíveis.....	49

4.2.1. Caracterização do metal de base.....	49
4.2.2. Metal de adição.....	49
4.2.3. Gás de proteção.....	50
4.3. Preparação dos corpos de prova.....	50
4.3.1. Preparação da chapa forjada do aço SAE 4340 para confecção dos CP's.....	50
4.3.2. Confecção dos corpos de prova para soldagem do aço SAE 4340.....	51
4.4. Testes de Soldagem.....	53
4.4.1. Testes preliminares para definição dos parâmetros de soldagem.....	54
4.4.2. Detalhamento dos testes preliminares.....	54
4.4.3. Testes principais de soldagem.....	57
4.5. Caracterização Macro e Microestrutural do aço SAE 4340 e dos Cordões de solda.....	58
4.5.1. Análise macrográfica.....	59
4.5.2. Análise micrográfica do aço SAE 4340 e dos cordões de solda.....	60
4.6. Ensaio de dureza.....	60
4.6.1. Testes de microdureza.....	60
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	62
5.1. Introdução.....	62
5.2. Avaliação dos parâmetros geométricos dos cordões de solda.....	63
5.3. Diluição.....	73
5.4. Resultados das microdurezas obtidas nos corpos de prova.....	74
5.5. Avaliação Micrográfica dos cordões de solda.....	79

6. CONCLUSÕES.....	84
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	86
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87
APÊNDICE I.....	94
APÊNDICE II.....	95

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

A soldagem é um método importante para a união de metais na construção de peças e estruturas. Por este motivo, e em função do desenvolvimento dos processos de fabricação e da engenharia de materiais, os processos de soldagem sofreram nos últimos anos um grande avanço tecnológico, tanto no que diz respeito aos processos quanto ao desenvolvimento de novos consumíveis.

Dentre os processos de soldagem existentes, estudos mostram que o processo de soldagem com arame tubular (Flux cored arc welding - FCAW), tem sido de grande interesse das empresas de fabricação mecânica, principalmente porque é a operação que reúne várias das necessidades atuais, principalmente no que diz respeito a alta produtividade, boa qualidade do cordão e baixo custo. Trata-se de um processo que consiste em alimentar continuamente o arame para a poça de fusão, sendo este protegido pela decomposição dos ingredientes do fluxo interno, no caso arame tubular autoprotégido, ou ainda, com a proteção do fluxo interno e suplementada pela proteção de um fluxo de gás fornecido por uma fonte externa, no caso arame tubular protegido.

O aço SAE4340 é um dos aços mais utilizados no setor mecânico, devido as suas características de grande resistência mecânica e tenacidade, características essas que são fundamentais para a fabricação de mecanismo em diversos setores da indústria (mecânica, aeronáutica, etc). No entanto, devido a sua alta temperabilidade, a soldagem deste aço deve ser realizada de forma mais cuidadosa, para evitar o endurecimento da sua ZTAe conseqüentemente a formação de fases duras que possam gerar micro trincas, Torres (2002).

CAPÍTULO 2

2.1. OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo geral analisar os efeitos térmicos do processo de soldagem FCAW sobre as propriedades metalúrgicas e geométricas da região soldada para o aço transformável SAE 4340.

2.2. Objetivos Específicos

- Verificar as propriedades metalúrgicas e geométricas do cordão de solda quando não se utiliza a técnica de pré e pós-aquecimento;
- Verificar as propriedades metalúrgicas e geométricas do cordão de solda quando se utiliza a técnica de pré e pós-aquecimento;
- Verificar qual é a condição de soldagem que apresenta menor percentual de fases duras (bainita e martensita) na zona termicamente afetada
- Verificar a condição de soldagem em que se obtém um cordão de solda com melhores condições geométricas como: penetração, reforço e diluição.

CAPÍTULO 3

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Soldagem a arco elétrico com arame tubular (FCAW)

Dentre os principais processos de união na fabricação industrial pode-se destacar o processo de soldagem FCAW (Flux Cored Arc Welding), também chamado de soldagem a arco com arame tubular.

Este processo apresenta inúmeras vantagens como: ser utilizado na soldagem de todos os metais comerciais e ligas especiais; ter altas taxas de deposição; poder executar longos cordões de solda em função da alimentação contínua do arame consumível e ainda ser um processo de fácil automação.

Segundo Marques, et. al.(2009), o processo FCAW é caracterizado pela abertura e manutenção do arco elétrico pelo simples contato entre o eletrodo consumível (arame) e o metal de base (peça). O início do processo consiste na aproximação da tocha a um ponto da peça onde a soldagem será realizada, levando ao disparo do gatilho, que por sua vez irá iniciar à alimentação contínua do arame (consumível) com a utilização ou não de um gás de proteção externo, levando ao processo de energização do circuito de soldagem. Em seguida ocorre a formação da poça de fusão e a movimentação uniforme (velocidade) da tocha ao longo da junta a ser soldada.

A fonte de energia utilizada no processo FCAW pode ser tanto um gerador ou um retificador, desde que os mesmos apresentem características de potencial constante, ou seja, geralmente a soldagem é realizada em corrente contínua, podendo ser também pulsada. Uma vez que ânodo tende a ter uma maior concentração de calor, resultando uma fusão mais rápida do arame de soldagem, aumentando assim a penetração e a velocidade de soldagem. (Wainer et. al. 1992; Cary e Helzer, 2005).

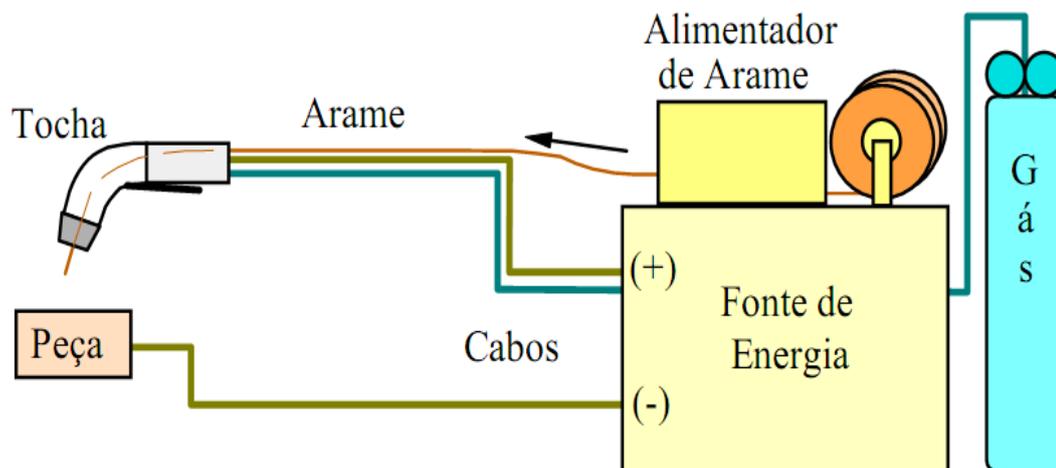
O processo de soldagem FCAW geralmente é operado de forma semi-automática,

mas em muitas situações, principalmente nas indústrias, podem ser automatizados através do uso de robôs, sendo o arame introduzido de forma contínua e com elevadas densidades de corrente no eletrodo, permitindo assim elevadas taxas de deposição e conseqüentemente maior produtividade. (Marques et. al., 2009).

Segundo Machado (2007), os equipamentos utilizados na soldagem FCAW, são praticamente os mesmos utilizados na soldagem GMAW, mas algumas adaptações devem ser realizadas no sistema de alimentação de arame, ou seja, sendo necessária a substituição das roldanas lisas (arames sólidos) por roldanas recartilhadas, para a correta utilização de arames tubulares.

Para a soldagem FCAW com o uso de arame tubular auto protegido, deve-se também realizar algumas modificações na pistola de soldagem. A figura 3.1 mostra, de forma esquemática, processo FCAW.

Figura 3.1 - Representação esquemática para o processo FCAW.



Fonte: Modenesi e Marques, 2006.

A taxa de deposição do processo FCAW é superior, se comparado com o processo de soldagem por eletrodo revestido (SMAW), ou seja, é cerca de duas vezes maior na posição vertical e seis vezes maior na posição horizontal/plana, podendo alcançar até 11 kg/h. Machado (2007).

O processo FCAW possui inúmeras vantagens em relação ao processo GMAW, e ao processo com eletrodo revestido (SMAW) devido a possibilidade de ajustes da

composição química, facilidade de operação em campo e principalmente em relação a sua flexibilidade além da alta produtividade comparada com os processos GMAW e SMAW. (Marques, et. al. 2009)

Segundo Quites (2002), as principais vantagens e desvantagens do processo FCAW, devem ser analisadas cuidadosamente.

As principais vantagens do processo FCAW são: qualidade da solda depositada, alta taxa de deposição de metal fundido, alta taxa de produtividade, cordões de boa aparência, soldagem da maioria dos aços, soldagem de materiais com espessuras elevadas, ser menos susceptível a trincas além de poder soldar em uma grande variação de ambiente, como por exemplo, ar livre quando se solda com o processo autoprotetido.

As principais desvantagens do processo FCAW são: soldagem em locais de difícil acesso, devido à necessidade do bocal da tocha de soldagem ficar próximo ao do metal base a ser soldado, geração de uma maior quantidade de fumos em relação ao processo GMAW, custo do arame tubular maior se comparado com o custo do arame do sólido, gera escória, necessitando assim de uma limpeza adequada para realização soldas de multipasses.

Apesar do processo FCAW ser relativamente simples e versátil, ele ainda apresenta certa dificuldade de operação, que está associada à definição correta dos parâmetros de soldagem, principalmente ao grande número de variáveis que este processo possui e pelas suas inter-relações.

Diante do exposto, torna-se necessário criar ferramentas capazes de prever os parâmetros e o comportamento operacional do processo, possibilitando assim uma maior segurança operacional com maior estabilidade para cada variável no processo e, acima de tudo, melhoria da qualidade do produto final com diminuição dos custos de fabricação. (Santana e Modenesi, 2011).

Segundo Wainer et. al. (1992), o domínio e o controle das variáveis do processo FCAW, são essenciais para a qualidade dos cordões de solda, pois qualquer

alteração que possa ocorrer nessas variáveis poderá implicar em perdas significativas na qualidade dos processos de soldagem, comprometendo a sua confiabilidade e produtividade.

A norma ASME, seção IX, edição 1983, cita que as principais variáveis que ocorre no processo, estão relacionadas com a qualificação dos procedimentos e na qualificação do soldador, sendo que na qualificação dos procedimentos os itens mais importantes estão relacionados ao tipo de metal-base; metal de adição e tratamentos térmicos após a soldagem, já as outras variáveis como o pré-aquecimento e tipo de gás de proteção podem ser essenciais dependendo das características e tipo de material a ser soldado e de sua aplicação.

Outro fator importante é o uso de células de fabricação automatizada para soldagem, sendo uma excelente alternativa para união de componentes estruturais em que se deseja produtividade, uniformidade, baixo nível de respingo e boa característica de união de juntas, proporcionando robustez e a repetibilidade, resultando em cordões livres de defeitos, tais como: porosidades, trincas, mordeduras, falta de fusão e penetração, podendo obter uma redução de aproximadamente 33% no tempo de soldagem e um aumento de produtividade de até 150% em comparação ao processo convencional manual. (Bonacorson e Hemmer, 2011).

3.2. Tipos de arames tubulares

Segundo Quites (2002), o processo de soldagem FCAW pode ser utilizado com gás de proteção externo ou não.

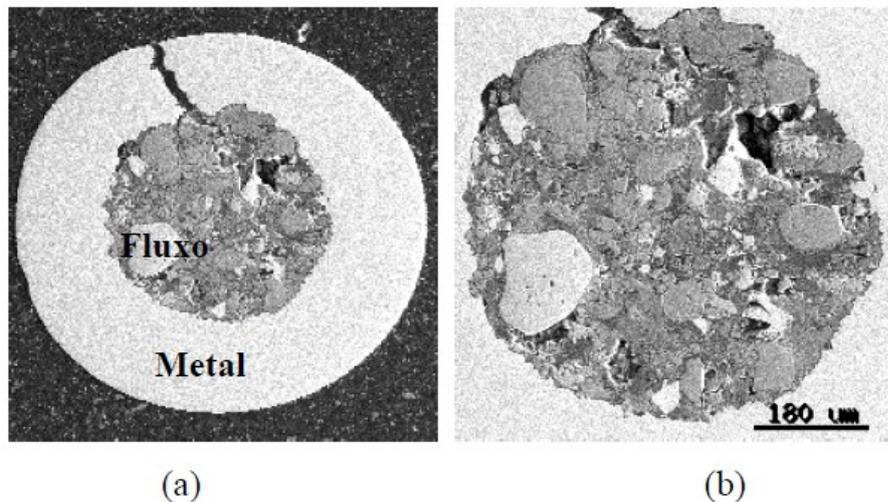
Quando o processo de soldagem não utiliza a proteção externa, o mesmo utiliza o arame tubular autoprottegido, ou seja, o fluxo que está dentro do arame tubular, ao se queimar produz o gás que protege o metal fundido, que após a sua solidificação, resulta na formação de uma escória vítrea, que proporciona uma fina camada protetora no cordão de solda, também proporciona antioxidantes, ionizantes, agentes purificantes e, se necessário, elementos de liga.

Quando o processo de soldagem utiliza a proteção gasosa externa, a mesma é

fornecida por um gás adicional que geralmente é o CO₂ puro, ou misturas desse gás com o argônio, e em algumas vezes com o oxigênio.

A figura 3.2(a) mostra a seção transversal de um arame tubular autoprottegido (fluxo interno), já na figura 3.2(b) pode-se observar o fluxo interno contendo diferentes materiais inclusive adições metálicas (partículas claras)

Figura 3.2 - Seção transversal de um arame tubular autoprottegido



Fonte: Modenesi, 2004.

3.2.1. Arames tubulares com fluxo metálico em seu interior

Dê acordo com a ESAB, (2004) os arames tubulares para soldagem em FCAW, podem ser classificados em metal cored ou flux cored.

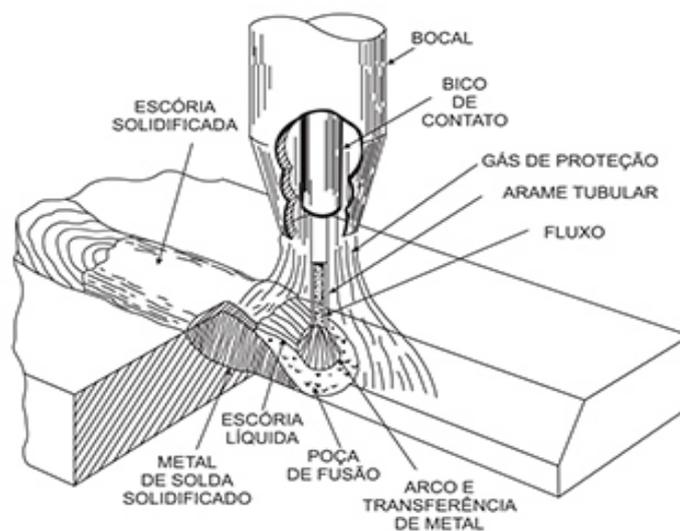
O arame “Metal Cored” é o tipo de consumível que apresenta em seu interior um fluxo que é composto por materiais metálicos em pó, que permite assim uma alta eficiência de deposição, ou seja, cerca de 95%, baixa quantidade de fumos, baixo índice de respingos e também baixo índice de hidrogênio são difusíveis. São arames de alta produtividade e indicados para soldagem de alta responsabilidade. Bastante utilizados na indústria automobilística, e mecânica pesada.

Já o arame “Flux Cored” possui no seu interior um fluxo composto por pós não metálicos. É um arame que tem alta produtividade em função de permitir soldar com

maior velocidade de soldagem. Este tipo de arame produz escória que além de proteger a poça de fusão, contribui para um melhor desempenho na soldagem fora de posição. Este tipo de arame é muito utilizado nas indústrias de construção naval, offshore e em pipelines.

Os arames “Flux Cored” podem ser encontrado no mercado no tipo rutilico ou básico, mas de modo geral, o rutilico é mais comum e indicado para aplicações gerais, já o básico é dedicado para aplicações que requerem altíssima tenacidade. A figura 3.3 apresenta a representação esquemática da soldagem com arames tubulares com proteção externa.

Figura 3.3 - Representação esquemática da soldagem com arame tubular com proteção externa



Fonte: ESAB, 2004.

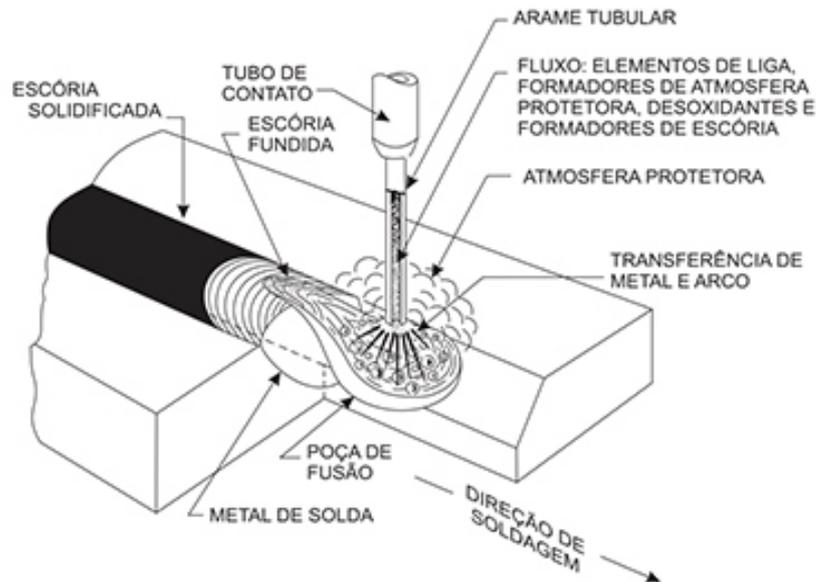
3.2.2. Arames tubulares com fluxo no seu interior ou arames autoprottegido.

O arame tubular “autoprottegido” é um consumível que não necessita de uma fonte externa de proteção gasosa durante a soldagem, ou seja, a parte interna deste arame é composta por um fluxo capaz de gerar os gases que, por sua vez, protegem a poça de fusão e o arco elétrico da atmosfera.

Estes arames são muito utilizados na soldagem em campo, pois proporcionam uma maior produtividade se comparado ao processo por eletrodo revestido. A figura 3.4

apresenta uma representação esquemática da soldagem com arames tubulares sem proteção gasosa externa.

Figura 3.4 - Representação esquemática da soldagem com arame tubular sem proteção externa.



Fonte: ESAB, 2004.

Segundo Marques et. al. (2009) para se adequar a algumas aplicações em específico, os arames tubulares possuem uma maior versatilidade em relação aos arames sólidos, devido à possibilidade de se alterar a formulação ou o percentual de fluxo, que pode variar de 15% a 50% do seu peso em média.

3.3. Gases de proteção e suas características

A principal função dos gases de proteção durante o processo de soldagem é evitar o contato do ar atmosférico com a poça de fusão, criando um escudo protetor entre o eletrodo e a poça de fusão, isto se torna necessário porque a maior parte dos metais em estado líquido quando em contato com o ar, tem uma grande tendência de formar óxidos. (Dutra, 1996).

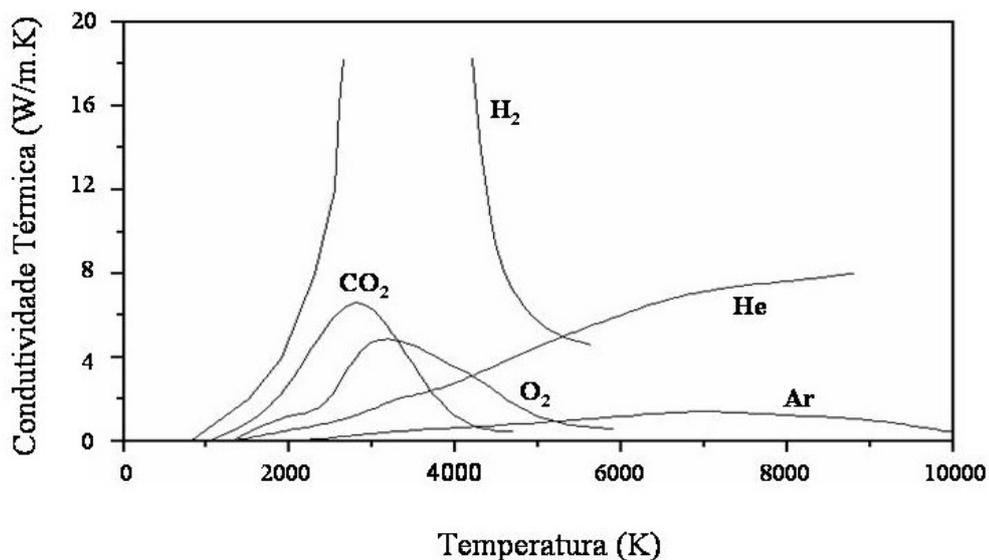
As variedades de composições de gases para o processo FCAW que atualmente existem no mercado, em muitos casos, não são adequadamente bem escolhidas e utilizadas pelos usuários, e conseqüentemente os mesmos não conseguem produzir

um bom resultado. Para Dutra (2008), esta dificuldade deve-se ao fato de que no processo, as propriedades de um gás ou misturas gasosas muitas vezes não são consideradas em conjunto com as propriedades das fontes de energia utilizadas.

Segundo Marques et. al. (2009), o tipo de gás utilizado no processo FCAW, influencia diretamente nas características do arco, na penetração, na largura e formato do cordão de solda, na transferência metálica, na velocidade de soldagem, nos surgimentos de mordeduras e por fim no custo operacional.

As propriedades térmicas dos gases em temperaturas elevadas devem ser consideradas quando na seleção dos mesmos, pois influenciam no desempenho dos processos de soldagem. Por exemplo, quando um gás apresenta maior condutividade térmica, maior deverá ser a tensão de soldagem para manter o arco aberto, isto ocorre devido à capacidade dos gases transferirem maior quantidade de calor a solda, por exemplo, veja a condutividade térmica do dióxido de carbono e do hélio, que é muito maior comparada ao argônio (figura 3.5), ou seja, tanto o dióxido de carbono quanto o hélio necessitarão de uma maior tensão de soldagem para conseguir manter o arco estável. (Hilton e Norrish, 1988).

Figura 3.5 - Condutividade térmica dos gases de soldagem



Fonte: Tusek e Suban, 2000.

Segundo Irving (1999), o custo final do processo de soldagem em aço carbono,

representa aproximadamente 77% de mão de obra, 18% de material consumível (arame), 2% de energia elétrica e apenas 3% são referentes ao custo do gás de proteção, sendo que os principais gases aplicados na soldagem são o hélio, argônio e CO₂.

Portanto, pode-se concluir que a utilização destes gases de forma mista, torna-se aparentemente mais interessante, que utilizar o hélio de forma pura, onde os dois gases podem se complementar com as suas propriedades. A tabela 3.1, mostra algumas propriedades dos gases de proteção utilizados na soldagem.

Tabela 3.1 - Gases de proteção e suas propriedades fundamentais.

Gás	Energia de Dissociação [e.v]	Energia de ionização [e.v]	Propriedades	Densidade a 115°C e 1atm (kg/m³)
Argônio	-	15.8	Inerte	1.69
Hélio	-	24.6	Inerte	0.169
Oxigênio	5.1	13.6	Oxidante	1.35
Dióxido de Carbono	4.3	14.4	Oxidante	1.59

Fonte: Boehme, 1990.

3.3.1. Gases de proteção para soldagem FCAW

Como já foi dito, atualmente existe uma grande variedade de combinações de misturas de gases, visando atender vários aspectos do cordão de solda, redução do índice de respingos, soldagem de peças das mais variadas espessuras, e acima de tudo redução de custos. As combinações de misturas de gases comerciais mais utilizadas atualmente estão relacionadas ao hélio, argônio, oxigênio e dióxido de carbono, podendo ainda conter nitrogênio e hidrogênio. (ESAB, 2005).

- Dióxido de Carbono

Segundo Bonanni (2005), o dióxido de carbono é o único gás reativo amplamente

usado em sua forma pura na soldagem de aços carbono e aços de baixa liga, proporcionando uma boa velocidade de soldagem, resistência mecânica, penetração e custo mais baixo quando comparado aos gases inertes. O único inconveniente, desta utilização é o alto índice de respingos, que compromete a qualidade final do cordão de solda com relação ao seu aspecto visual, o que pode comprometer a sua utilização quando o aspecto visual é preponderante.

Segundo Bracarense, (2005) o dióxido de carbono (CO_2) é muito utilizado na soldagem com arames tubulares (FCAW), sendo utilizado normalmente nas transferências do tipo globular, podendo também em alguns casos serem utilizados em transferências do tipo Spray.

- Mistura de gases

Para Machado (2007), a combinação tanto do CO_2 quanto do O_2 no Ar (argônio) tem como objetivo aumentar a fluidez do metal fundido e gerar um grande número de pontos catódicos sobre a região da ponta do arame consumível, já o uso apenas do argônio puro, ocasionará apenas um ponto catódico, resultando em um cordão de solda com geometria irregular e conseqüentemente permitindo a contaminação pela atmosfera da poça de fusão, por outro lado, a adição de CO_2 a partir de 10% vai gerando um arco cada vez mais instável, até atingir os 30%, que a partir deste instante o arco ficará semelhante ao uso do CO_2 usado de forma pura.

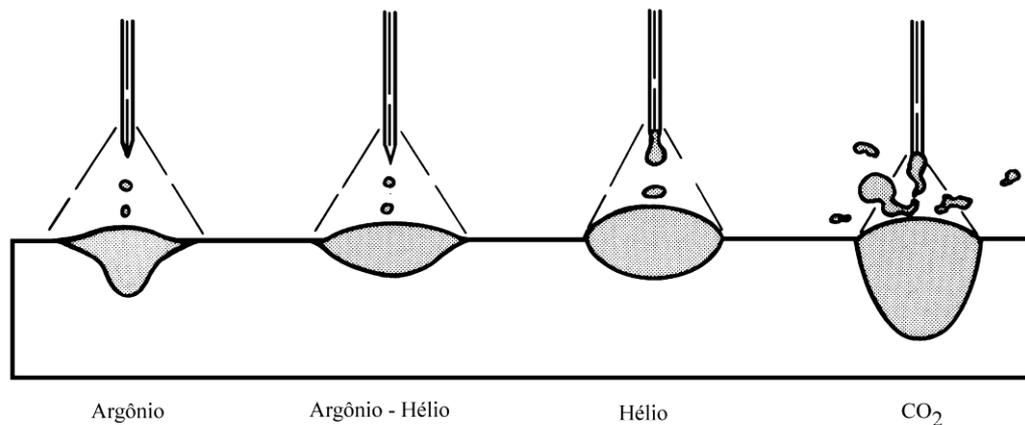
Segundo Wainer, et. al. (1992), a adição de um gás inerte como o argônio aumenta a eficiência da transferência dos desoxidantes que estão no fluxo do arame, melhora a aparência do cordão, diminui a quantidade de respingos, mas por outro lado encarece o processo e reduz a penetração.

De acordo com Moyer (2002), tanto o uso do argônio quanto do hélio, (gases inertes), apresentam excelentes resultados na soldagem em metais não ferrosos, mas o mesmo não se pode dizer na soldagem em materiais ferrosos, onde o arco se apresenta na maioria das vezes de forma irregular, comprometendo na qualidade final do cordão. Assim adições de dióxido de carbono entre 3% a 25% ou pequenas

adições de oxigênio de 1% a 5%, proporcionará melhoras significativas na qualidade do cordão de solda e também no aumento da produtividade.

As misturas com He e CO₂, geralmente são ocasionadas maiores quedas de tensão e também são geradas as maiores quantidade de calor no arco elétrico, considerando as mesmas condições de operações (corrente e distância do eletrodo-peça) comparadas com o argônio. (Marques et. al., 2009). A figura 3.6 mostra o perfil típico dos cordões de solda realizados com diferentes tipos de gases e misturas.

Figura 3.6 - Perfis de penetração e de transferência típicos em soldagem GMAW com alguns gases de proteção.



Fonte: AWS, 1991.

Segundo Bracarense (2005), existe diversos tipos de misturas disponíveis no mercado, sendo que a mais utilizada no processo FCAW é com 75% de Argônio (Ar) e 25% de dióxido de carbono (CO₂), que proporciona um cordão com maior limite de escoamento e resistência a tração em relação à soldagem com 100% de proteção com CO₂.

3.4. Metalurgias da soldagem

A soldagem é um processo de fabricação simples que pode ser classificado de acordo com a fonte de energia empregada para a união dos materiais. Mas por outro lado, apesar desta simplicidade, não se pode esquecer que a soldagem pode ser muitas vezes um processo “traumático” para o material, envolvendo, em geral, a

aplicação de uma elevada densidade de energia em um pequeno volume do material, o que pode levar a alterações estruturais e de propriedades importantes dentro e próximo da região da solda. (Modenesi, 2004).

Essas alterações são chamadas de transformações metalúrgicas e são consequências das temperaturas usadas na soldagem e também dos ciclos térmicos, que devem ser acompanhados e controlados.

Entre os fatores mais importantes a serem considerados no estudo da transferência de calor em juntas soldadas, estão relacionados os insumos de calor ou energia, rendimento térmico do arco elétrico, distribuição e picos de temperatura, tempo de permanência à temperatura pré-estabelecida de soldagem, a velocidade de resfriamento da zona de solda e os ciclos térmicos que podem além de provocar efeitos danosos à estrutura da solda, também podem gerar deformações residuais. (Wainer et. al. 2010).

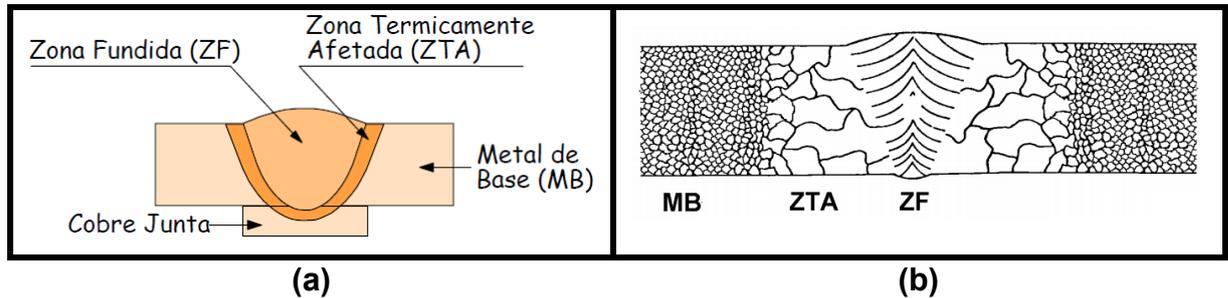
As transformações metalúrgicas promovem o surgimento de tensões residuais nas juntas soldadas e suas adjacências, devido a não uniformidade das temperaturas, podendo desenvolver efeitos indesejáveis na região de soldagem e originar a propagação de trincas, corrosão sob tensão e fadiga, limitando assim o seu campo de utilização. (Pukasiewicz et. al. 2004).

3.4.1. Regiões da junta soldada

Segundo Lancaster (1999), a variação da temperatura, o meio de resfriamento, a composição química do metal de base e a composição química do metal de adição influenciam diretamente nas características microestruturais dos materiais soldados, e conseqüentemente pode comprometer as propriedades mecânicas.

Uma junta soldada apresenta basicamente três regiões principais de interesse que são elas, a região da zona fundida, a região da zona termicamente afetada e o metal de base. A figura 3.7(a) apresenta esquematicamente essas três regiões e a figura 3.7(b) apresenta também esquematicamente o tamanho do grão de cada uma dessas regiões.

Figura 3.7 - Representação esquemática das regiões de uma soldagem (a) representação esquemática do tamanho de grão de cada região (b).



Fonte: Modenesi, 2004

- Zona termicamente afetada

A zona termicamente afetada (ZTA) é a região da solda onde a estrutura do metal é modificada, devido ao rápido aquecimento e resfriamento que ocorre durante o processo de soldagem. É uma região na qual não ocorre variação na composição química do metal de base (Koçak, 2010).

Segundo Fortes (2004), as composições químicas do consumível, condições operacionais de soldagem, influenciam diretamente na temperatura entre passes, ocasionando transformações microestruturais na ZTA, alterando assim as propriedades mecânicas do material, como por exemplo, a dureza.

A dureza pode ser reduzida na ZTA, utilizando de uma técnica chamada de revenimento, que pode reduzir a dureza em até 20% da dureza máxima na ZTA. Outra maneira de reduzir a dureza na ZTA é pelo pré-aquecimento, que além de aumentar a largura da ZTA, aumenta a energia final de soldagem, diminuindo assim a taxa de resfriamento, fazendo com que haja uma redução de dureza nesta região. (Kiefer, 1995).

- Zona fundida

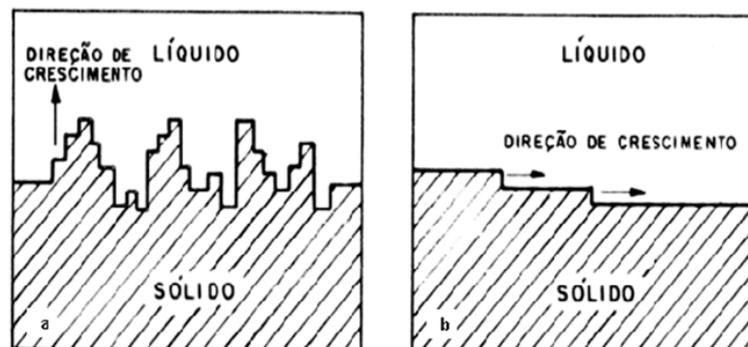
Na zona fundida (ZF) é a região onde ocorre a fusão do metal de adição e também a diluição entre o metal de base e metal de solda. De modo geral, pode-se dizer que nesta região o metal depositado apresenta estrutura metalográfica colunar, também

conhecida como estrutura dendrítica, apresentando características de metal fundido (Grong, 1994).

Durante a fusão e a solidificação da poça de fusão, o metal líquido se solidifica dando origem ao cordão de solda, que por sua vez determina as diversas características macroscópicas e microscópicas, e é geralmente acompanhada por uma contração de volume em até 6% para os metais ferrosos e não ferrosos comuns, e mudanças de composição química no sólido, devido às segregações. (Wainer et. al. 2010).

De acordo com Flemings (1994), os estudos dos processos que ocorrem na interface sólido/líquido, podem ser analisados e visualizados, desde os níveis atômicos como a níveis macroscópicos, ou seja, dependendo dos tipos de interfaces, como por exemplo: as inclusões em micrômetros; espaçamentos dos braços da dendrita, em fração de milímetros, tamanho de grãos em milímetros a centímetros e na escala de metros para produtos fundidos e lingotes. Já o crescimento na interface sólido/líquido pode ser obtido de duas maneiras, conforme apresentada na figura 3.8.

Figura 3.8 - Crescimento na interface sólido/líquido.



(a) interface atômica difusa;

(b) interface atômica plana.

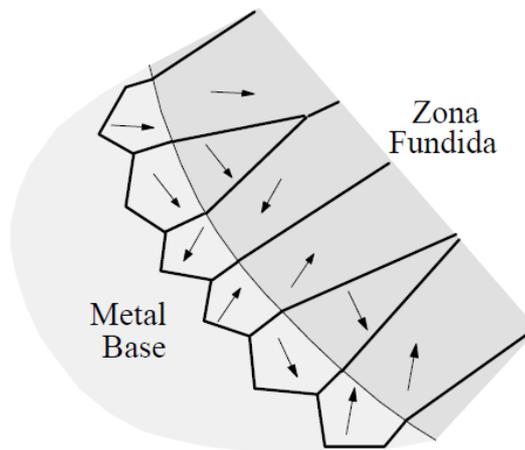
Fonte: WAINER et. al, 2010.

Na figura 3.8(a) é representada a situação que ocorre mais usualmente na solidificação de metais e ligas, e representa a mesma temperatura de resfriamento (ΔT) e um crescimento contínuo mais acelerado, para o caso da figura 3.8 (b), ou seja, na interface atômica plana é mais comum a ocorrência na solidificação

de não metais, sendo que o crescimento pode ser lateral, por degraus e necessita que a nucleação ocorra em duas dimensões (Wainer et. al., 2010).

Segundo Kou (1987), durante o fenômeno de solidificação, ocorre a formação de grãos com orientações cristalográficas na direção do gradiente máximo de temperatura, e seu crescimento barra o crescimento de outros grãos que estão em outras direções de crescimento, ou seja, com orientações cristalográficas diferentes do gradiente máximo de temperatura. A figura 3.9 apresenta este fenômeno de crescimento de grão na zona fundida.

Figura 3.9 - Representação esquemática do crescimento de grãos na zona fundida.



Fonte: Modenesi, 2004.

- Zona de ligação

Kou (1987) afirma que na região limite entre a poça de fusão líquida e o metal de base (sólido) ocorre um crescimento de grãos em direção à linha central da solda, formando o metal de adição, este crescimento é chamado de epitaxial.

Segundo Wainer, et. al. (2010), para que ocorra o crescimento epitaxial, é necessário que haja um pequeno super-resfriamento, de aproximadamente 1°C, e este fenômeno é que vai determinar se a estrutura final da solda será grosseira ou refinada, ou seja, quanto maior o tamanho do grão do metal de base, mais grosseira é a solda obtida. A figura 3.10, mostra que o crescimento epitaxial também se

encontra presente entre os cordões de solda, além do metal de base e da zona de fusão.

Além do crescimento epitaxial, também existe um diferente mecanismo atuando no crescimento dos grãos, conhecido por crescimento competitivo da estrutura de solidificação, que diferente do epitaxial, os grãos tendem a crescer na direção perpendicular à frente de solidificação, mas com direções preferenciais ao crescimento (nas direções CCC e CFC $\langle 100 \rangle$ e $\langle 1010 \rangle$ para HC). (Humphreys, 2001).

Figura 3.10 - Crescimento epitaxial entre os cordões de solda.



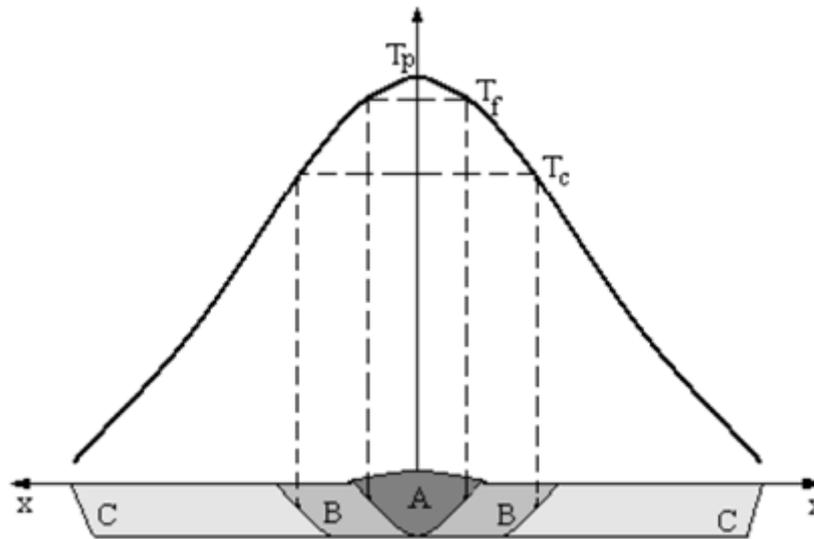
- (a) Metal fundido;
- (b) Zona de ligação;
- (c) Zona afetada termicamente.

Fonte: FBTS, 2000.

- Metal de Base

Segundo Marques et. al. (2009), a região de metal de base (MB) refere-se à região mais afastada do cordão de solda e que não foi afetada pelo calor, ou seja, não sofreu variação microestrutural após o processo de soldagem, devido às temperaturas de pico (TP) ser inferiores às temperaturas que promovam as transformações metalúrgicas do material. A figura 3.11, mostra o perfil térmico após a soldagem de um metal de base por fusão.

Figura 3.11 - Perfil térmico obtido após o processo de soldagem por fusão.



A - Zona Fundida (ZF)

B - Zona Termicamente afetada (ZTA)

C - Metal de Base (MB)

Fonte: Marques et. al. 2009.

3.5. Tratamentos térmicos

Silva e Mei (2010) definem que os tratamentos térmicos são conjuntos de operações de aquecimento e resfriamento, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, tendo como objetivo principal alterar as propriedades mecânicas de acordo com as características desejadas para o seu campo de aplicação.

A maioria das peças usadas na construção mecânica exige determinados requisitos para que possam ser usadas de forma que resistam satisfatoriamente às condições de serviços a que deverão ser empregadas. Estes requisitos estão relacionados principalmente as propriedades mecânicas compatíveis com as cargas previstas do projeto, e também devem estar livres de tensões internas. (Godoy et. al. 2008).

A microestrutura obtida após o tratamento térmico dependerá basicamente do histórico da temperatura e do tempo, pois as transformações de fases sempre vão

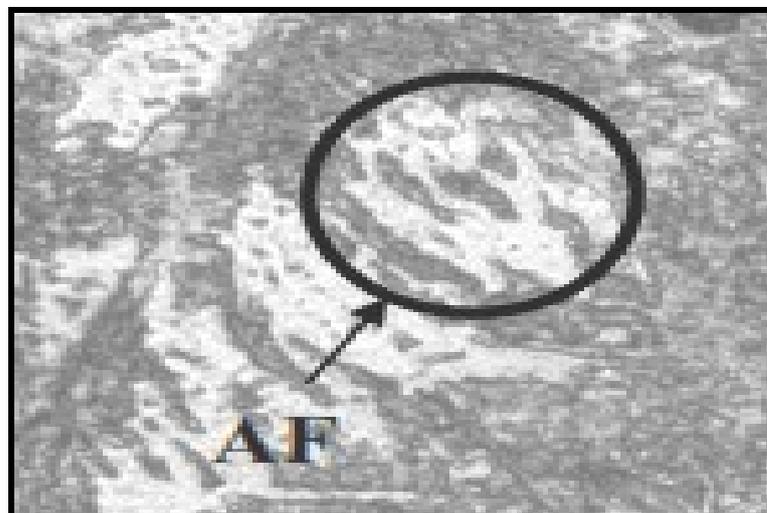
depender do tempo. (Shackelford, 2008).

Grande parte dos aços de construção mecânica foi desenvolvida para serem utilizados normalmente após os tratamentos de endurecimento, também conhecido por têmpera e revenimento, mas de modo geral, segundo Callister (2002), os principais objetivos dos tratamentos térmicos em aços, são: remover as tensões internas decorrentes de processos mecânicos de conformação ou até mesmo térmicos, controle do tamanho de grão (refino), aumento da ductilidade, melhoria da usinagem, aumento da resistência ao desgaste, melhoria no controle da corrosão, modificação de propriedades elétricas e magnéticas, aumento da resistência a fluência e aumento ou diminuição da resistência mecânica e dureza. Estes tratamentos térmicos podem ser realizados antes ou após a soldagem, em metais ou ligas metálicas. (ASM, 1991).

3.5.1. Pré-aquecimento antes da soldagem

Para Nunes (2011), o pré-aquecimento da peça antes da soldagem, a escolha correta do eletrodo e o tipo de junta, pode melhorar a tenacidade da zona termicamente afetada pela solda, e para isto o metal de enchimento ou consumível devem apresentar uma microestrutura contendo ferrita acicular (AF). A figura 3.12, apresenta a formação típica de uma ferrita acicular (AF) na soldagem.

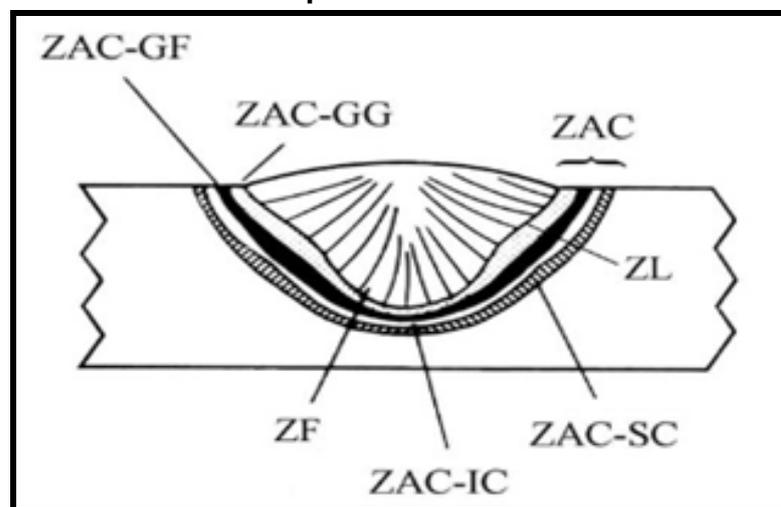
Figura 3.12 - Análise metalográfica da solda, na região do metal de adição, com formação de ferrita acicular.



Fonte: Barbedo, 2011.

Segundo Wainer et. al. (2010), as regiões obtidas na soldagem com passe único são: zona fundida (ZF), constituída pelo metal de adição; zona de ligação (ZL), constituída por uma estreita região onde ocorre uma fusão parcial do metal base junto à zona fundida e a zona afetada pelo calor e zona afetada pelo calor (ZAC), região do metal de base que sofreu alterações microestruturais causadas pelo calor da soldagem, que também podem ser subdividas e citadas conforme mostrada na figura 3.13.

Figura 3.13 - Representação esquemática das zonas de uma solda com passe único.



Fonte: ASM, 1992.

- Região ZAC de grãos grossos (ZAC-GG): obtidas em temperaturas de 1200 a 1500°C, são caracterizadas com grãos de tamanho maior.
- Região ZAC de grãos finos (ZAC-GF): obtidas em temperaturas de 900 a 1200°C, são caracterizadas com grãos de tamanho menor.
- Região ZAC intercrítica (ZAC-IC): obtidas entre as linhas A_{C1} e A_{C3} , apresentando uma mistura de austenita, ferrita e constituintes não transformadas.
- Região ZAC subcrítica (ZAC-SC): Obtidas em temperaturas entre 500 e 700°C (abaixo da temperatura eutetóide), não apresentando neste caso mudanças estruturais visíveis, geralmente em aços temperáveis, o aporte térmico provoca um revenimento na microestrutura.

Segundo Bailey (1994), a técnica de soldagem multipasses permite obter uma estrutura mais refinada devido à presença de zonas reaquecidas dentro da zona

fundida e o refino parcial da microestrutura pelo passe subsequente aumenta a heterogeneidade na microestrutura e afetando as propriedades mecânicas da peça soldada.

Segundo Azevedo (2002), a re-austenitização e o aquecimento subcrítico podem causar alterações microestruturais e afetando as propriedades da ZAC, conforme se pode confirmar na figura 3.14. Das regiões de superposições apresentadas na figura 3.14 a ZAC-GG (grãos grossos), possui ductilidade limitada e baixa resistência a clivagem, devido aos contornos de grãos serem um local preferencial para nucleação de novas fases, ou seja, quanto maior o tamanho do grão austenítico, menor será quantidade de contorno por unidade de volume, proporcionando assim, maior tempo de incubação da austenita e maior temperabilidade do aço, facilitando neste caso a formação de martensita na ZAC-GG. Então estas zonas são conhecidas como zonas frágeis localizadas (ZFL), as quais também são constituídas por várias outras zonas como, a ZAC-GG (grãos grossos) Inalterada; zona da ZAC-GG (grãos grossos) reaquecida intercriticamente; zona ZAC-GG (grãos grossos) reaquecida subcriticamente, e nas adjacências da zona de ligação (ZL). Segundo a ASM (1992) as ZFLs quando alinhadas favorecem a propagação de trincas e conseqüentemente a fratura ao longo da zona de ligação.

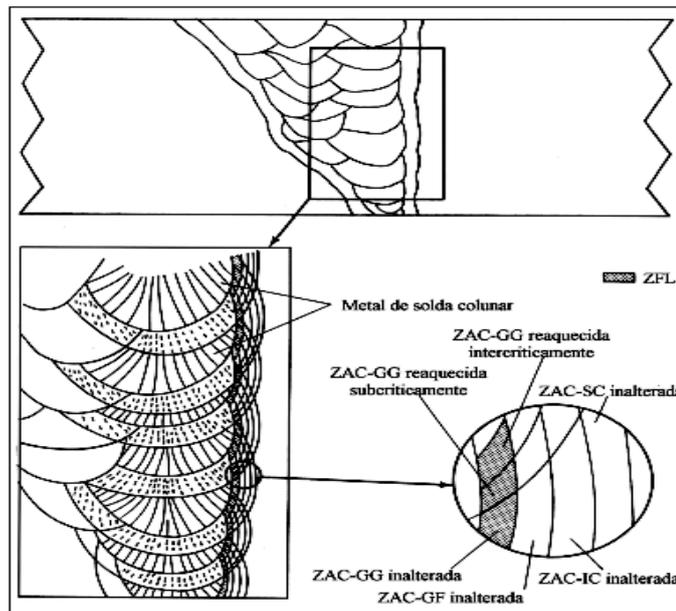
Segundo Aguiar (2001), na soldagem multipasses as referidas regiões da solda são submetidas a ciclos térmicos múltiplos devido aos vários passes, provocando novas alterações nas microestruturas destas regiões, pois o calor gerado pelo ciclo térmico de um passe pode ser aproveitado para fazer um tratamento térmico no passe anterior, evitando assim muitas vezes o tratamento pós-soldagem.

Matsuda et. al. (1978), relata que o processo de agitação eletromagnética, consiste em uma corrente de soldagem radial a partir de um arco em banho de fusão, (vista superior da figura 3.15) que passa quase paralelamente pela superfície da chapa (vista lateral da figura 3.15).

Quando o campo magnético é introduzido na poça de fusão na direção perpendicular à superfície da chapa durante a soldagem, um metal fundido é formado em volta devido à interação do campo de corrente de soldagem e do magnetismo, (forças de

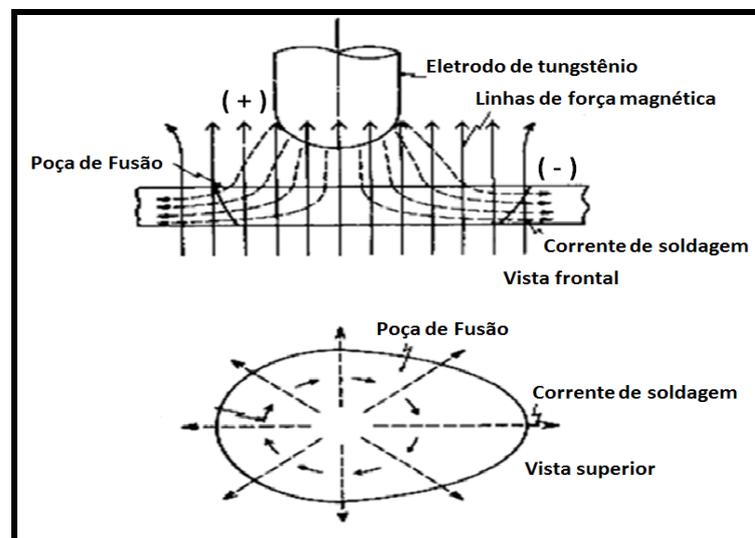
Lorentz) conforme mostra a figura 3.15. A agitação eletromagnética é um dos métodos mais eficientes para a melhoria da estrutura de solidificação da solda, contudo os efeitos da intensidade de frequência, campo magnético, velocidade de soldagem e corrente de soldagem nas estruturas das solidificações das soldas, devem ser investigadas.

Figura 3.14 - Representação esquemática das regiões de superposições de de ZACs.



Fonte: ASM, 1992.

Figura 3.15 - Representação esquemática do princípio de funcionamento da agitação mecânica por eletromagnetismo.



Fonte: Matsuda et. al., 1978.

Segundo Barra (2003), a técnica por pulsação térmica é a combinação de duas fases, base térmica (bt) e pulso térmico (pt), em que as mesmas oscilam em um determinado tempo, e servem como parâmetros de tempo, corrente e de velocidade de alimentação do arame do processo MIG/MAG pulsado, gerando assim uma corrente média de base térmica (I_{mbt}) e uma corrente média de pulso térmico (I_{mpt}), provocando assim uma variação do aporte térmico e consequentemente uma mudança de ciclo térmico durante a soldagem, obtendo-se assim uma estrutura refinada com melhores características mecânicas, diminuindo assim o risco de surgimento de defeitos, como as trincas de solidificação.

A técnica por pulsação térmica refina os grãos, através da nucleação heterogênea devido ao efeito da pulsação sobre a agitação da poça de fusão, variando assim a corrente, que por sua vez irá influenciar na força eletromagnética, podendo reduzir os níveis de penetração, porosidade e macro segregação. (Kou, 1987)

Para Reddy e Mohandas (2001), a técnica de pulsação de corrente nos processos MIG/MAG é uma excelente alternativa para controle do refino de grão na zona fundida (ZF) e na transição do modo de crescimento colunar para equiaxial, na soldagem em diversos tipos de materiais, como o alumínio, aço carbono, aço inoxidável e do titânio.

3.5.2. Tratamentos térmicos

Segundo Aguiar (2001), a presença da fase martensita não revenida nas regiões das juntas soldadas juntamente com as tensões residuais provocadas pelos processos de soldagem podem causar a formação de micro trincas, para alguns tipos de materiais. Assim, torna-se necessário um tratamento térmico pós-soldagem, com o objetivo principal de aliviar as tensões internas causadas pelos efeitos térmicos da soldagem e ao mesmo tempo controlar e ajustar as propriedades mecânicas de acordo com o desejado.

3.5.3. Tipos de tratamentos térmicos

Para Silva e Mei (2010), os tratamentos térmicos pós-soldagem (TTPS), de modo

geral, são caros e demorados, devido ao longo tempo de permanência na temperatura de tratamento, dificultando ainda mais em aplicações em que as estruturas são de grande porte. Atualmente, vários tratamentos térmicos são utilizados, os mais importantes são apresentados a seguir:

- Reozimento

Para Colpaert (2008), o reozimento tem a função de recuperar as propriedades originais de um material que foram alteradas por um tratamento térmico ou mecânico e também pode ser usado para homogeneizar ou refinar estruturas brutas fusão.

Segundo Krauss (1997), os tipos de reozimentos mais comuns são: reozimento pleno ou supercrítico, reozimento para alívio de tensão e recristalização ou reozimento intercrítico. O reozimento pleno o tratamento pode ser realizado das seguintes maneiras: para aços hipereutetóides, o aço pode ser aquecido aproximadamente 50°C acima de A_1 e para aços hipoeutetóides aproximadamente 50°C acima da linha A_3 (figura 3.16) sendo que em ambos os casos o resfriamento lento, dentro do próprio forno. Callister, (2002).

Já o reozimento subcrítico, o aquecimento é realizado abaixo da temperatura A_1 , neste caso o tratamento é usado com o objetivo de recuperar a ductilidade do aço, que foi deformado ou encruado, também são aplicáveis para tratamentos de alívio de tensão, devido as tensões residuais oriundas dos processos de soldagem, dobramento, têmpera, etc. O reozimento intercrítico ou esferoidização, é obtido pelo aquecimento acima de A_1 , onde inicia-se a formação da austenita, que ao ser resfriada abaixo da linha A_1 , transforma em uma estrutura de ferrita e carbonetos esferoidizados ou ferrita e perlita (ASM, 1994). Conforme apresentada na figura 3.16.

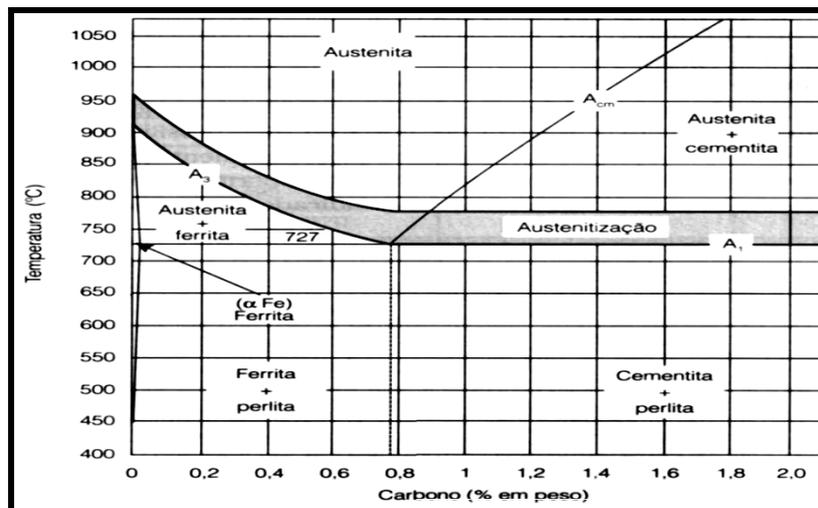
- Normalização

A normalização é um tratamento indicado para obter uma estrutura mais homogênea e refinada, melhorando assim a resistência e tenacidade do aço, onde aços são aquecidos acima da linha crítica superior (A_1 e A_{cm}) e posteriormente resfriados lentamente ao ar livre, Silva e Mei (2010).

Segundo Colpaert (2008), a normalização pode ser empregada na homogeneização de peças forjadas e fundidas (principalmente peças de grandes dimensões); correção de tratamentos térmicos incorretos e em ocasiões onde a aplicação de têmpera e revenimento não são aplicáveis economicamente.

Já para Callister(2002), a normalização possui praticamente as mesmas particularidades do recozimento, ou seja, diferenciando apenas na questão do resfriamento que é mais rápido, (comparado com o recozimento) em que o aço é geralmente resfriado ao ar livre, o resultado deste resfriamento é uma estrutura grão homogêneos e mais fina do que a estrutura apresentada nos demais processos recozimentos, obtendo assim uma estrutura um pouco mais dura e resistente que no recozimento.

Figura 3.16 - Representação esquemática das faixas de temperatura indicada para austenitização no recozimento.



Fonte: Silva e Mei, 2010.

- Têmpera

O tratamento de têmpera é o tratamento mais importante para os aços utilizados em aplicações mecânicas. As operações de aquecimento são praticamente as mesmas usadas na normalização e recozimento, diferenciando apenas no meio como aço será resfriado, ou seja, resfriamento rápido (brusco) geralmente em um meio líquido (óleo ou água). O objetivo deste tratamento é obter um material mais resistente, porém o que se obtém ao final deste tratamento é um material com elevada dureza e

fragilidade, que deve ser imediatamente corrigido por outro tratamento conhecido por revenimento, (Shackelford, 2008).

- Revenimento

O revenimento é um tratamento pós-têmpera que visa modificar a estrutura obtida pela têmpera, aliviando as tensões internas e reduzindo assim um pouco a sua dureza e fragilidade, resultando em um material mais tenaz. A temperatura usada neste tipo de processamento é sempre abaixo da zona austenítica (A_1), com tempo prolongado, (Silva e Mei, 2010).

3.6 - Metalografia

Para Colpaert (2008), a metalografia é uma técnica da metalurgia física, que analisa os metais sob o ponto de vista estrutural, com o intuito de relacionar principalmente as propriedades físicas, composição, processo de fabricação, de modo a esclarecer, ou prever o comportamento do material sobre uma determinada aplicação, por meio de observação, com ou sem o uso de microscópio. No caso do auxílio de um microscópio, a análise é conhecida por micrografia, neste caso o objetivo principal é visualizar e analisar a textura microscópica do material, dimensão e formato dos grãos, proporção de fases e microconstituintes formados durante a cristalização ou tratamentos térmicos específicos.

Para uma análise superficial, com o intuito de verificar apenas aspectos macroscópicos, a observação é feita a olho nu ou no máximo 10 vezes de aumento, com o auxílio de uma lupa. (Silva e Mei, 2010). Por meio das análises macrográficas e micrográficas é possível a determinação de diversas características do material, inclusive a determinação das causas de fraturas, desgastes prematuros e outros tipos de falhas. (Colpaert, 2008).

3.6.1. Microestrutura formada nos aços

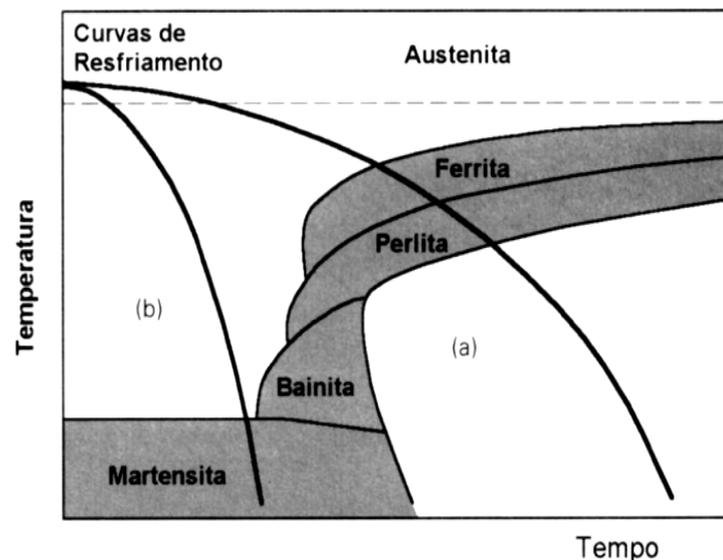
Dê acordo com Okumura e Taniguchi (1982), os aços uma vez aquecidos na temperatura de austenitização, podem sofrer alterações microestruturais e,

consequentemente, suas propriedades mecânicas podem ser também alteradas de acordo com a velocidade de resfriamento.

O objetivo principal de um tratamento térmico de têmpera em aços é produzir uma estrutura predominantemente martensítica ao longo de toda a seção reta do material, e isto dependem principalmente de três fatores: a composição da liga, do tipo e da natureza do meio de resfriamento e do tamanho e da forma da amostra. (Callister, 2008).

Outra estrutura comum após o aquecimento de aços acima da zona de austenitização é a bainita (estrutura intermediária entre a perlita fina e a martensita, com resistência também intermediária), e esta pode ser obtida por transferência isotérmica, entre as faixas de temperaturas de transformações martensíticas e de ferrita e perlita, e através do resfriamento contínuo. Na figura 3.17, são apresentadas curvas de resfriamento que resultam na formação das microestruturas comuns aos tratamentos. (Abdalla, 2006).

Figura 3.17 - Representação esquemática do diagrama TRC para duas curvas de resfriamento.



Fonte: Marques et. al. 2009.

3.6.2. Microestrutura formada na Zona Fundida

Segundo Modenesi (2004), os efeitos e as transformações microestruturais na zona

fundida (ZF) geralmente são decorrentes da composição química. De acordo com Colpaert (2008), os principais constituintes que geralmente são formados em metal de solda de baixo carbono são os apresentados na tabela 3.2.

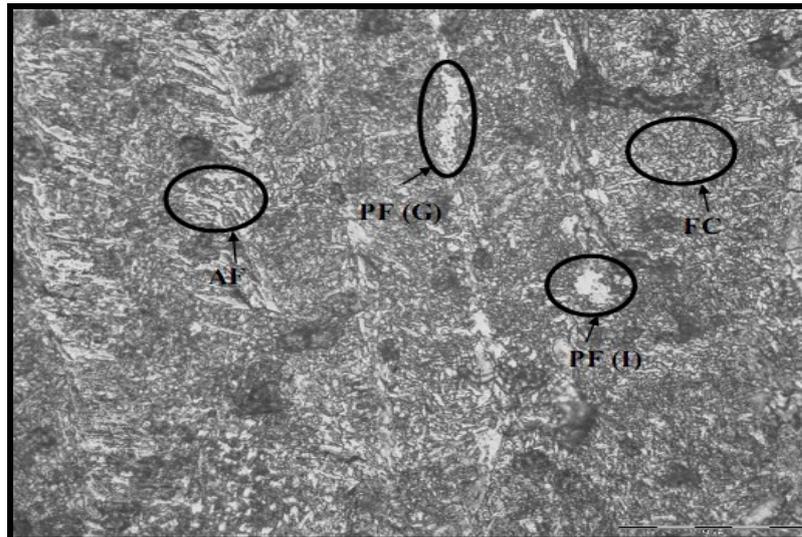
Tabela 3.2 - Classificação de microestrutura de metal de solda de baixo carbono.

Categoria principal do constituinte	Subcategoria do constituinte	Abreviação
Ferrita primária		PF
	Ferrita de contorno de Grão	PF(G)
	Ferrita poligonal intergranular	PF(I)
Ferrita com segunda fase		FS
	Com alinhamento de segunda fase	FS (A)
	Com alinhamento de fase não alinhada	FS (NA)
	Com placas laterais de ferrita (sideplates)	FS (SP)
	Bainita	FS (B)
	Bainita superior	FS (UB)
	Bainita inferior	FS (LB)
Ferrita acicular		AF
Agregado ferrita carboneto		FC
Martensita	Perlita	FC (P)
	Martensita em ripas	M (L)
	Martensitamaclada	M (T)

Fonte: adaptado, COLPAERT, 2008.

Barbedo (2011) observou por meio do processo GMAW na zona de fundição do aço carbono ASTM A36, as seguintes microestruturas: grãos colunares de ferrita acicular (AF), com ferrita de contorno de grão PF(G), regiões com ferrita com segunda fase FS, tanto nas regiões próximas ao metal base quanto nas regiões próximas ao metal de solda FS, ferrita intragranular poligonal PF(I) ferrita primária PF e agregado ferrita carboneto FC, conforme apresentado na figura. 3.18.

Figura 3.18 - Micrografia mostrando as microestruturas do metal de solda.



Fonte: Barbedo, 2011.

3.6.3. Microestrutura formada na Zona Termicamente afetada (ZTA)

Para Modenesi (2004), os ciclos térmicos a que as regiões próximas às zonas fundidas estão submetidas provocam alterações microestruturais significativas, levando a formação da conhecida ZTA. A faixa que abrange a ZTA está diretamente ligada ao aporte térmico sofrido por esta região e este aporte também tem forte influência na dureza apresentada nesta região. Esta dureza pode ser reduzida por meio de um pré-aquecimento, aumentando assim energia final de soldagem e a faixa da ZTA, evitando desta forma, a possibilidade de que essa região venha a sofrer fissuração por corrosão sob tensão (AWS, 1995).

Segundo Barbedo (2011), na zona termicamente afetada pelo calor (ZTA) do aço ASTM A36, existe também a presença de grãos de perlita e ferrita, porém, devido ao calor, estes grãos são menores em comparação aos encontrados no metal de base, conforme figura 3.19.

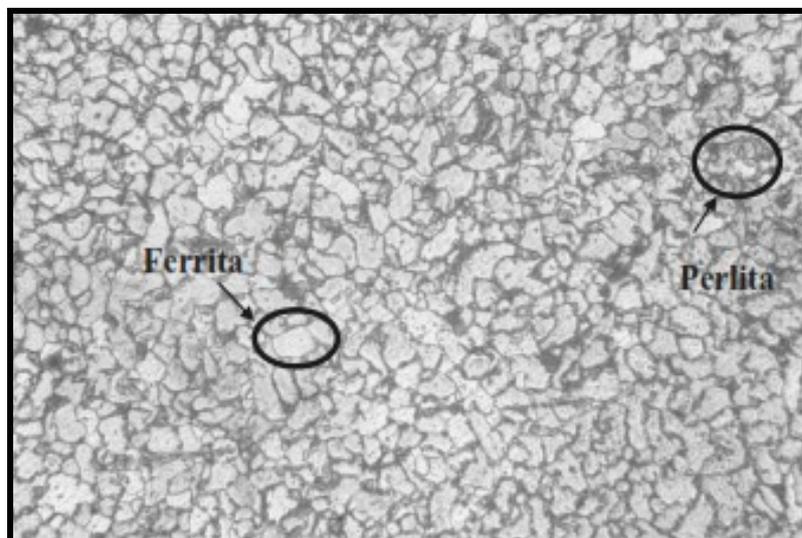
3.6.4. Microestrutura formada na Zona de Ligação

Dê acordo com a (AWS 1992), na região da zona de ligação (região descrita anteriormente no item 3.4.1) podem ocorrer deformações e trincas de solidificação,

principalmente nos contornos de grãos a devido à diminuição de volume na solidificação (contração térmica).

Segundo Kaçar e Kokemli (2005), a ferrita acicular é a microestrutura responsável pelo aumento da tenacidade de metais de solda de aço carbono de baixa liga. Os elementos de ligas responsáveis pelo refino de grãos de ferrita acicular são o Ti e o Nb, que atuam com barreiras, impedindo o movimento dos contornos de grão de austenita, evitando assim o seu crescimento e favorecendo a formação da ferrita acicular mais refinada (Moreira, 2008).

Figura 3.19 - Micrografia das microestruturas de ferrita e perlita na ZTA.



Fonte: Barbedo, 2011.

CAPÍTULO 4

4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL E EQUIPAMENTOS

4.1. Descrição Geral do Trabalho

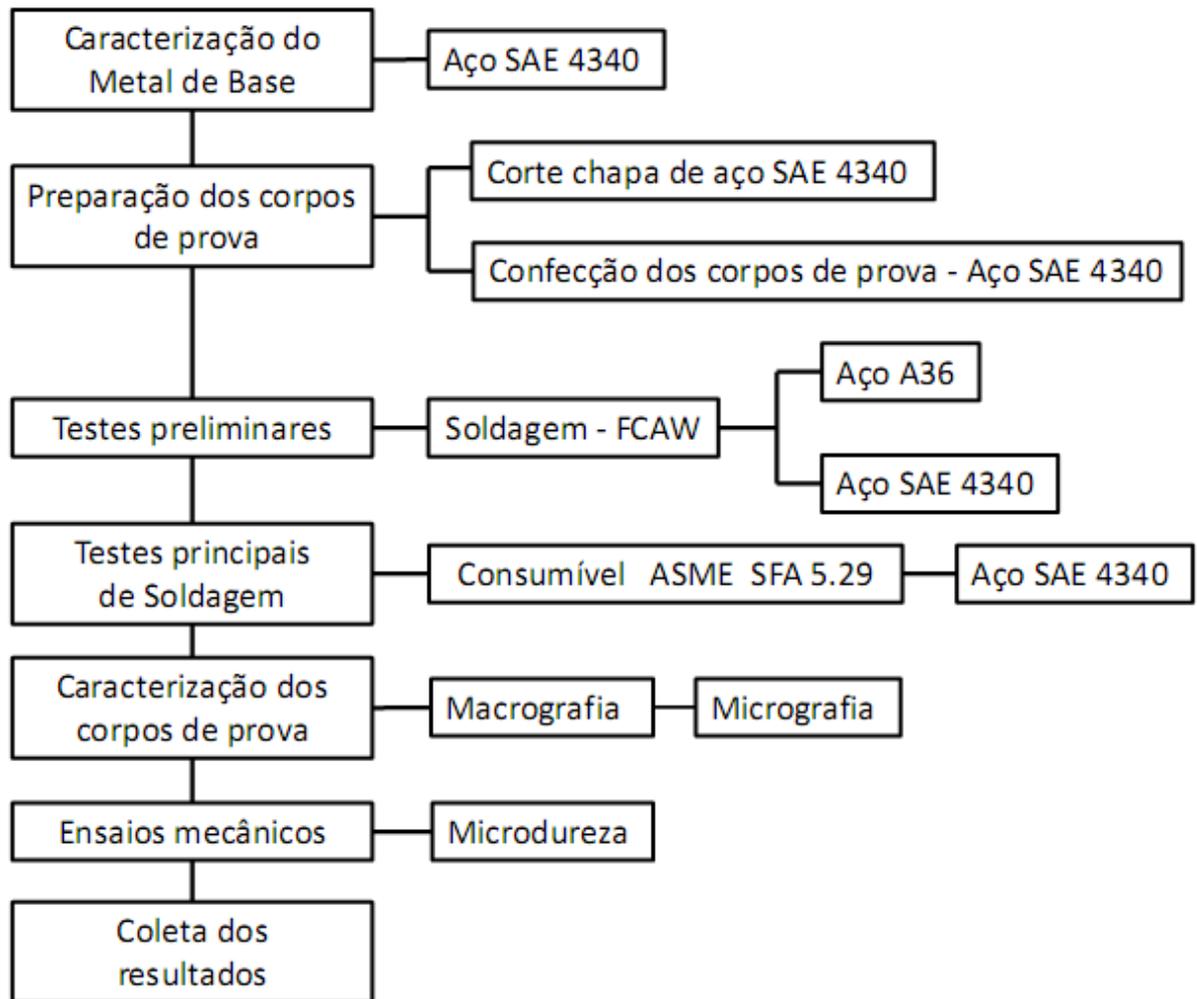
O trabalho de pesquisa desenvolvido foi essencialmente experimental, envolvendo a deposição de cordões de solda sobre chapa de aço SAE 4340 utilizando o processo de soldagem com arame tubular (FCAW).

Foram feitos testes com diferentes condições soldagem, compreendendo a realização de deposição dos cordões em corpos de prova sem pré-aquecimento, com pré-aquecimento e com pós-aquecimento em diferentes temperaturas.

O efeito das diferentes condições de soldagem foi verificado por meio da análise das propriedades mecânicas e da microestrutura do material após a soldagem. Com relação às propriedades mecânicas, foi avaliada a distribuição da microdureza ao longo da seção transversal dos corpos de prova soldados. Com relação às características geométricas dos cordões de solda, a análise foi feita por meio das técnicas metalográficas, o que possibilitou observar a zona fundida, a zona termicamente afetada pelo calor e o metal de base. Já a análise microestrutural foi realizada utilizando o método da microscopia óptica, o que permitiu observar a microestrutura das regiões da solda.

O detalhamento para uma melhor clareza das etapas do trabalho experimental pode ser visto no fluxograma mostrado na FIG. 4.1. A primeira etapa refere-se à caracterização do metal de base. A segunda etapa refere-se à preparação dos corpos-de-prova. A terceira etapa refere-se aos testes preliminares para a definição dos parâmetros de soldagem. A quarta etapa refere-se à soldagem dos corpos de prova com os parâmetros definidos na terceira etapa. A quinta etapa refere-se preparação dos corpos de prova para a realização da análise metalográfica, a sexta etapa refere-se aos ensaios para verificar as propriedades mecânicas da solda e a sétima e última etapa refere-se a análise dos resultados.

Figura 4.1 - Representação esquemática do Fluxograma experimental



Fonte: Próprio autor

Para este estudo experimental foi utilizada a técnica de planejamento fatorial com dois níveis (2^n), sendo 2 o número de níveis, ou seja, as variações numérica ou de presença ou não de cada um dos dois ($n=2$) parâmetros operacionais (corrente, temperatura de pré e pós-aquecimento). Este planejamento gerou 8 condições (2^3) experimentais distintas, que foi repetida uma vez gerando um total de 16 corpos de prova soldados. Com este método experimental foi possível a extração de resultados com 95% de confiabilidade, que apresentaram as melhores combinações dos parâmetros de entrada para uma microestrutura mais fina com presença de mais grãos equiaxiais, assim como um menor percentual de fases duras como a bainita e a martensita, ou com presença destas fases com menores níveis de tensões residuais comprovado através de um menor nível de dureza.

4.2. MATERIAIS E CONSUMÍVEIS

4.2.1. Caracterização do Metal de Base

O metal de base utilizado neste trabalho foi o aço SAE 4340 forjado com espessura de 5/8", nas dimensões de 50 x 120 mm. O SAE 4340 é um aço para beneficiamento com elevada temperabilidade, ligado ao cromo-níquel-molibdênio. Este aço é utilizado na fabricação de diferentes componentes mecânicos, principalmente estruturais, onde se necessita homogeneidade de dureza ao longo da seção transversal em pequenas ou grandes seções, além de resistência e tenacidade.

As principais aplicações do aço SAE 4340 forjado são em: eixos, engrenagens planetárias, colunas, mangas, componentes para equipamentos de produção e perfuração de petróleo, cilindros inclusive com seções espessas, quando se deseja uma combinação de resistência mecânica média e resistência à fratura (Villares Metals, 2008).

Conforme já foi dito, o aço SAE 4340 possui soldabilidade ruim e média capacidade de usinabilidade, devido a sua alta temperabilidade, porém apresenta boa resistência à torção e a fadiga, e pode ter suas propriedades mecânicas melhoradas através do tratamento térmico de nitretação (Catálogo Gerdau, 2004). O aço SAE 4340 possui limite de resistência à tração de 85 a 100 kgf/mm², dureza de 250 a 302 HB (101 a 107 HRB) (Villares Metals, 2008). A sua especificação química é apresentada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Especificação química (% em peso) do aço SAE 4340.

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
0,38 - 0,43	0,60 - 0,80	0,15 - 0,30	0,70 - 0,90	1,65 - 2,0	0,20 - 0,30

Fonte: Villares Metals, 2008.

4.2.2 - Metal de Adição

Para a realização dos cordões de solda foi utilizado como metal de adição o arame

tubular “ASME SFA 5.29” no diâmetro de 1,2mm, devido ao mesmo apresentar propriedades mecânicas e especificações químicas compatíveis a soldagem proposta. A Tabela 4.2 apresenta a especificação técnica do arame e a Tabela 4.3 apresenta as propriedades mecânicas do arame.

Tabela 4.2 – Especificação química do arame (%).

Material	C (%)	Si (%)	Mn (%)	Ni (%)	Mo (%)
ASME SFA 5.29	0,05	0,50	1,50	1,65	0,10

Fonte: ESAB, 2005.

Tabela 4.3 - Propriedades mecânicas do arame.

Material	L.R (MPa)	L.E (MPa)	Alongamento (%)	Charpy-V/ [J] -40°C
ASME SFA 5.29	720	670	20	40

Fonte: ESAB, 2005.

4.2.3. Gás de Proteção

O gás de proteção utilizado para a realização dos testes de soldagem neste trabalho foi uma mistura de 85% de argônio (Ar) e 15% de dióxido de carbono (CO₂) conforme especificado pelo fabricante (ESAB).

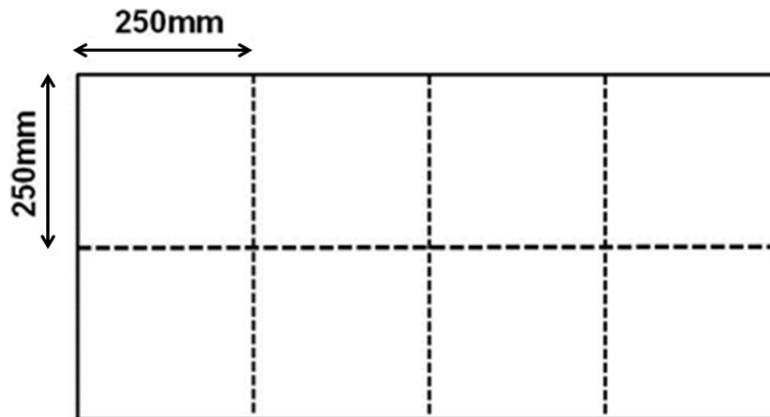
4.3. PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA (Cp)

4.3.1. Preparação da Chapa Forjada do Aço SAE 4340 para confecção dos CPs.

Como o material para a realização da solda foi recebido na condição forjado, sob forma de chapa, nas dimensões: 16 mm de espessura, 500 mm de largura e 1000 mm de comprimento, foi necessários cortá-lo com o auxílio de um maçarico oxi-corte, nas dimensões de 16 x 250 x 250 mm de maneira a facilitar a produção dos

corpos de prova para a soldagem. A representação esquemática da preparação da chapa forjada do aço SAE 4340 é apresentada na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Representação esquemática da preparação da chapa forjada do aço SAE 4340.



Fonte: Próprio autor

4.3.2. Confeção dos Corpos de Prova para Soldagem do Aço SAE 4340

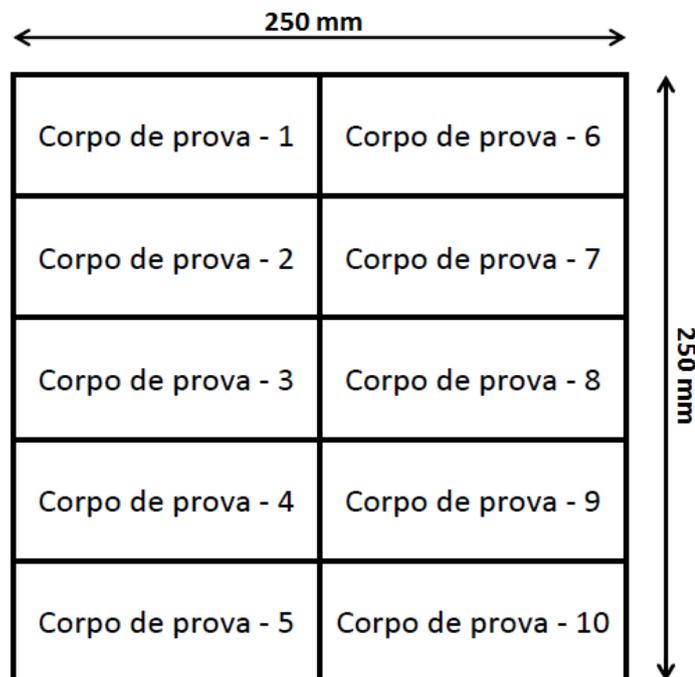
Após a chapa de aço SAE 4340 ter sido cortado com o auxílio do maçarico oxi-corte, todas as peças foram submetidas ao tratamento térmico de normalização. Este procedimento foi adotado devido a altas temperaturas geradas na chapa durante o procedimento de corte. O objetivo desta normalização foi para garantir a uniformidade microestrutural dos corpos de prova e evitar a presença de outras fases, como martensita e/ou bainita, que poderiam ter sido geradas durante o processo de corte devido a alta temperabilidade do aço SAE 4340.

Para a realização do tratamento térmico de normalização foi utilizado um forno elétrico tipo Câmara, Brasimet, modelo K-400, com variação de temperatura de 0°C à 1300°C. As condições para a realização deste tratamento térmico foram: temperatura do tratamento térmico 910°C e tempo de encharque 60 min (Machado, 1996). Após o tempo de encharque, as chapas foram retiradas do forno e colocadas pra resfriar ao ar livre, sem correntes de ar, conforme recomendações de Villares (1983).

Para a confeção dos corpos de prova (CP's), as peças tratadas termicamente foram

cortadas novamente, com o auxílio de uma serra de fita da marca Manrod, modelo MR-122, refrigerada a óleo. Os corpos de prova para a soldagem tiveram aproximadamente as seguintes dimensões: 16 x 50 x 122,5 mm. A Figura 4.3 mostra a representação esquemática da disposição dos corpos de prova para a soldagem. Após os cortes, as superfícies dos corpos de prova foram fresadas com o auxílio de em uma fresadora ferramenteira, para que fosse retirada a carepa proveniente do tratamento térmico e as rebarbas dos cortes com a serra alternativa.

Figura 4.3 - Representação esquemática das disposições dos corpos de prova para a soldagem (cortados).



Fonte: Próprio autor

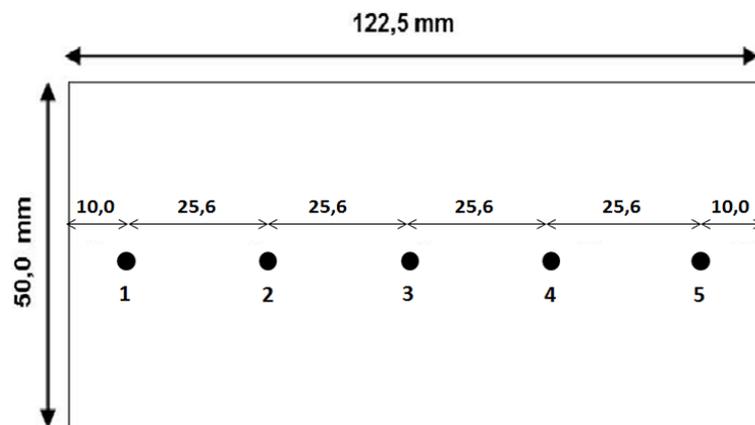
É importante ressaltar que após a normalização, confecção e limpeza dos corpos de prova, foi escolhido aleatoriamente três corpos de prova para que pudesse ser realizado teste de dureza e verificar a eficiência do tratamento térmico, ou seja, verificar se a dureza apresentada antes dos cortes (material como recebido) não sofreu variação brusca, o que poderia levar ao comprometimento de suas propriedades e conseqüentemente das análises futuras.

A medição de dureza nestes corpos de prova foi realizada conforme representação esquemática na Figura 4.4. “Foram cinco pontos distintos, utilizando medições de

dureza Rockwell-B com penetrador esférico de 1/16", pré carga de 10 kg e carga total de 100 kg..

A distância utilizada entre as medições de cada um dos pontos foi aproximadamente de 25,6 mm. A distância da extremidade esquerda até o ponto 1 e a distância da extremidade direita até o ponto 5 foi de aproximadamente 10 mm.

Figura 4.4 - Posições das medições de dureza realizadas após tratamento térmico de normalização, confecção e limpeza do corpo de prova.



Fonte: Próprio autor

4.4. TESTES DE SOLDAGEM

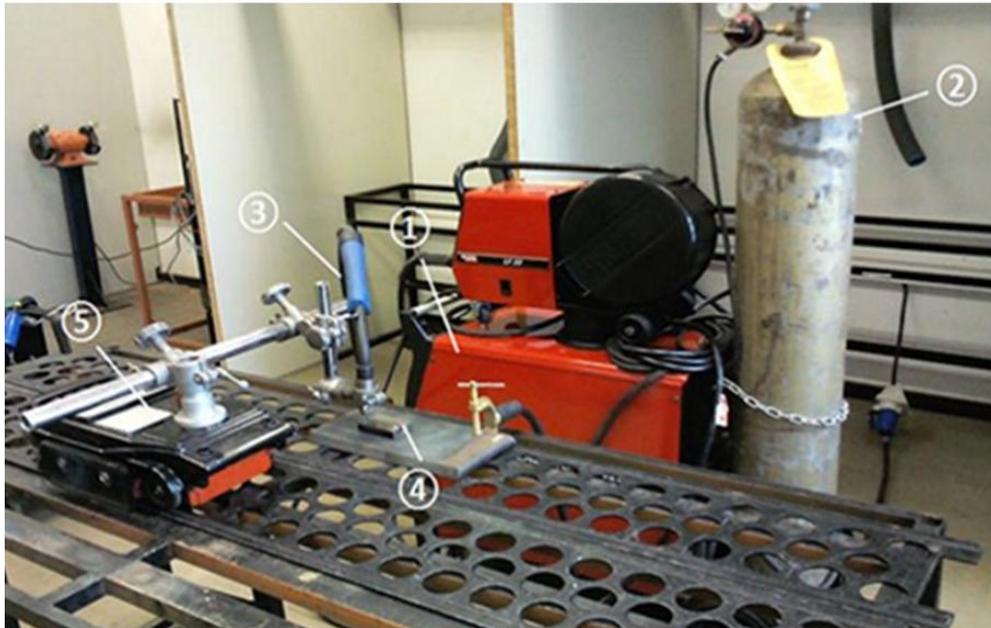
Para a execução de todos os cordões de solda foi utilizada uma fonte de soldagem do fabricante Lincoln Electric, modelo Idealarc CV-420 com alimentação de 220/380/440 V do tipo transformador-retificador, trifásico, com características de tensão constante e corrente contínua.

O sistema de alimentação do arame utilizado para a realização dos testes de soldagem foi um alimentador da Lincoln Electric modelo F-33, com velocidade de alimentação podendo variar de 1,0 a 20 m/min. Este alimentador permite utilizar arames nos diâmetros de 0,8 a 1,6 mm.

Para a execução de todos os cordões de solda foi utilizado uma mesa de soldagem dotada de um sistema mecanizado de deslocamento da tocha (tartaruga), modelo SB1-30 do fabricante Soldas Brasil, alimentação AC 220 V; 50/60 Hz, com

velocidade podendo variar de 50 à 3800 mm/min. Este sistema permitiu controlar a velocidade de soldagem e o sentido de deslocamento tocha durante os testes. A Figura 4.5 mostra a montagem final da bancada de testes utilizada para a execução de todos os cordões de solda deste trabalho.

Figura 4.5 - Bancada de testes



Legenda: 1) fonte de energia; 2) gás de proteção; 3) tocha; 4) corpo de prova; 5) carro tartaruga.

Fonte: Próprio autor

4.4.1. Testes preliminares para a definição dos parâmetros de soldagem

Os testes de soldagem realizados neste trabalho foram divididos em duas etapas. Para os testes da primeira etapa (testes preliminares) foram executados cordões de solda sobre chapas em aço A36, com o intuito de avaliar a soldabilidade e as propriedades geométricas do cordão obtidas com o arame tubular “ASME SFA 5.29”. Na segunda etapa os testes (testes principais) foram executados cordões sobre chapa de SAE 4340 com o arame tubular “ASME SFA 5.29”. Em ambos os casos foi utilizado o processo de soldagem FCAW.

4.4.2. Detalhamento dos testes preliminares

Nos testes preliminares foi utilizado o arame tubular ASME SFA 5.29 no diâmetro de

1,2 mm. A soldagem foi feita sob chapas, em aço carbono ASTM A36, utilizando um valor de corrente de 150 A, tensão de 29 V e velocidade de soldagem de 240 mm/min. Nestas condições de soldagem foi obtido um cordão largo, com falta de penetração causando um superaquecimento no metal de base.

Em seguida, com o intuito de reduzir a largura do cordão de solda e o superaquecimento do metal de base, a velocidade de soldagem foi alterada para 320 mm/min, sendo mantidos os demais parâmetros estabelecidos anteriormente.

Com a mudança do valor da velocidade de soldagem houve melhora do aspecto do cordão, porém a penetração ainda manteve-se inferior ao esperado. Em função da falta de penetração adequada, foi realizado um novo teste, porém com a velocidade de soldagem de 400 mm/min. Apesar do acabamento do cordão ficar razoável, a altura do cordão ficou acima do normal, houve grande presença de respingos e a penetração ainda se manteve inferior a desejada.

Como os resultados obtidos anteriores não foram satisfatórios, foi necessário alterar os parâmetros da corrente e tensão para 200 A e 30 V, respectivamente, e fazer novos testes com as três velocidades de soldagem estabelecidas anteriormente (240 mm/min; 320 mm/min; 400 mm/min). Após estes testes, ficou definido que os cordões realizados com a velocidade de 320 mm/min apresentaram os resultados mais próximos dos desejados.

A Tabela 4.4 apresenta de forma compilada os parâmetros de soldagem utilizados nos testes iniciais, executados com o consumível: ASME SFA 5.29 em chapas de aço carbono ASTM A 36.

Após os testes preliminares que foram realizados no metal base aço ASTM A36, ficou definido que seriam feitos os testes no metal base aço SAE 4340 com os seguintes parâmetros de soldagem: corrente de soldagem 200 A, tensão de soldagem 30 V nas velocidades de soldagem de 240 e 320 mm/min.

Ficou definido também que um dos testes seria realizado com pré-aquecimento a uma temperatura de 300°C. Observou-se nesta etapa, que para a soldagem sem pré-aquecimento os resultados foram satisfatórios em relação ao acabamento e

aspecto do cordão, apesar da baixa penetração tanto para as velocidades de 240 e 320 mm/mim. Para a soldagem com pré-aquecimento, os resultados obtidos foram satisfatórios na velocidade de 320 mm/mim em todos os aspectos, inclusive com relação à penetração. Para a realização deste pré-aquecimento também foi utilizado o forno elétrico tipo Câmara, Brasimet, modelo K-400, com variação de temperatura de 0°C à 1300°C, o mesmo forno utilizado para o tratamento térmico.

Devido à baixa penetração obtida na soldagem com 200 A e sem pré-aquecimento, foi realizado mais um teste, alterando desta vez a corrente de soldagem de 200 A para 250 A, mantendo a velocidade em 320 mm/mim. O resultado obtido foi satisfatório em todos os aspectos em relação aos parâmetros geométricos do cordão.

Tabela 4.4 - Parâmetros utilizados nos testes iniciais realizados com o consumível ASME SFA 5.29 em chapas de aço carbono ASTM A36.

Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade soldagem (mm/min)
29	150	240
29	150	320
29	150	400
30	200	240
30	200	320
30	200	400

Fonte: Autor

A Tabela 4.5 apresenta de forma compilada os parâmetros utilizados nos testes iniciais executados com o consumível: ASME SFA 5.29 em chapas de aço SAE 4340, com e sem pré-aquecimento.

Tabela 4.5 - Parâmetros utilizados nos testes iniciais realizados com o consumível: ASME SFA 5.29 em chapas de aço SAE 4340, com e sem o pré-aquecimento.

Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade soldagem (mm/min)
30	200	240
30	200	320
27,5	250	320

Fonte: Próprio autor

4.4.3. Testes principais de soldagem

Após a realização dos testes preliminares foram estabelecidas as variáveis de entrada e seus respectivos níveis. Os testes principais foram executados utilizando o consumível ASME SFA 5.29, no diâmetro de 1,2 mm e o metal base de aço SAE 4340.

As Tabelas 4.6 e 4.7 apresentam respectivamente as variáveis de soldagem e a matriz experimental, trazendo informações dos níveis das variáveis para cada uma das condições de soldagem. Vale ressaltar que foram feitas réplicas e que essas réplicas não foram feitas após o cordão principal, elas foram executadas em uma seqüência aleatória entre qualquer uma das oito condições.

Por meio dos valores de entrada e da matriz de experimentação (Tabelas 4.6 e 4.7) foram realizados todos os cordões de solda, e aplicado o método de delineamento de experimentos com fatorial completo (2^3) + uma réplica, totalizando dezesseis corpos de prova. Mas devido aos ajustes analógicos que são realizados nos equipamentos, os valores estipulados pela matriz de experimentação não foram idênticos aos ajustes práticos realizados na máquina de solda, apresentando uma pequena variação.

Tabela 4.6 - Variáveis de entrada com seus respectivos níveis para o eletrodo básico (planejamento fatorial 2^3 com + 1 repetição) - 16 corpos de prova.

Variáveis	Nível (-)	Nível (+)	Parâmetros Fixos		
			Tensão (V)	Velocidade (mm/min)	Stick-out (mm)
Corrente CC+ (A)	250	290	27,5	320	15
Temperatura:pré-aquecimento(°C)	*-	350 (1h)	27,5	320	15
Temperatura:pós-aquecimento(°C)	-	550 (3h)	27,5	320	15
Gás de Proteção	85% Argônio + 15% de CO ₂				
Vazão do gás de proteção	13 l/min				

* (-) Significa que não houve presença do tratamento

Fonte: Próprio autor

Tabela 4.7 - Matriz da Experimentação.

Ordem de Execução Aleatorizada		Condições	Variáveis de entrada.		
			Corrente (A)	Temp. Pré (°C)	Temp. Pós
*1.3	2.1	1	-	-	-
1.8	2.6	2	-	-	+
1.1	2.3	3	-	+	-
1.7	2.2	<u>*4</u>	-	+	+
1.2	2.7	5	+	-	-
<u>*1.4</u>	2.5	6	+	-	+
1.6	2.8	7	+	+	-
1.5	<u>*2.4</u>	8	+	+	+

Fonte: Próprio autor

OBS: *O primeiro número significa os blocos, 1 e 2, sendo que o bloco 2 é a réplica . O segundo número apresenta uma das 8 condições experimentais, ou seja, 1.4 e 2.4, significa que as duas amostras foram soldadas na mesma condição 4 (- + +), em ordem de execução distintas.

4.5. Caracterização Macro e Microestrutural do aço SAE 4340 e dos cordões de solda.

A primeira etapa de caracterização macro e microestrutural após a deposição do cordão de solda consistiu no corte das amostras no sentido transversal do cordão de solda. A operação de corte foi realizada com o auxílio de uma máquina de corte com disco abrasivo. Todas as peças foram cortadas com a refrigeração do fluido lubrificante e refrigerante. Na Figura 4.6 podem-se observar as imagens, como exemplo, de alguns corpos de prova soldados após o corte e as amostras obtidas a partir deste.

Após a obtenção das amostras para a caracterização, estas amostras foram preparadas para a análises macrográficas e micrográficas, seguindo as técnicas metalográficas convencional, consistindo em lixamento em lixadeiras elétricas com lixas d'água de granulometrias distintas (#220, #320, #400 e #600 e #1200) e polimento mecânico, utilizando a alumina de 1 µm e 0,3 µm como lubrificante. Após o polimento, todas as amostras foram submetidas ao ataque químico na superfície do cordão de solda, conduzido por imersão no reativo Nital 5%.

Figura 4.6 - Imagens, como exemplo, da etapa inicial de preparação de amostras para a caracterização macro e microestrutural do cordão de solda.



(a) Corpo de prova soldado após o corte; (b) Amostras produzidas a serem caracterizadas.

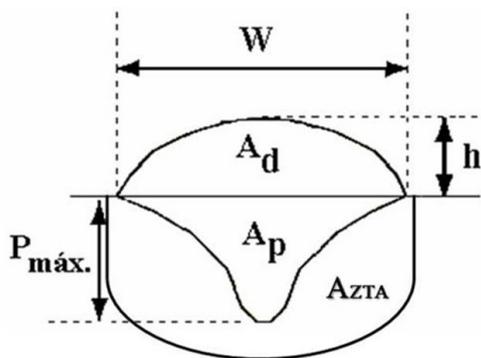
Fonte: Próprio autor

4.5.1. Análise Macrográfica

Para analisar e mensurar as regiões do cordão de solda foi utilizado o Software Analysis 5.1, digital soft imagingsolution, acoplado ao estereoscópio Olympus, modelo: SZ-61, com zoom de 0,67x, ocular de 20x, Câmera Digital Color CCD Câmera DSP e o Software Analysis 5.0 FIVE, digital imaging Solutions Olympus, (ampliação de 13x).

A Figura 4.7 ilustra esquematicamente dos parâmetros geométricos e as regiões analisadas do cordão de solda.

Figura 4.7 - Representação esquemática dos parâmetros geométricos considerados para a análise dos cordões de solda.



W = Largura (mm)
 h = Reforço (mm)
 $P_{máx}$ = Penetração máxima (mm)
 A_d = Área depositada (mm^2)
 A_p = Área de penetração (mm^2)
 A_{zta} = Área da zona termicamente afetada (mm^2)

Fonte: Adaptado, MODENESI, 2005.

4.5.2. Análise Micrográfica do aço SAE 4340 e dos cordões de solda.

A caracterização microestrutural das regiões da solda foi realizada posteriormente ao exame macroestrutural, novamente envolvendo os mesmos procedimentos metalográficos usados na macrografia, ou seja, o corte das amostras, lixamento, polimento e ataque com reativo químico com Nital5%. Na Tabela 4.8 podem ser verificadas as composições dos reagentes empregados tanto para a análise macrográfica como para a avaliação micrográfica das peças.

Tabela 4.8 - Reagentes químicos utilizados na caracterização macrográfica e micrográfica das amostras.

Reagente	Composição
Nital 5%	5 ml de ácido nítrico, 90 ml de álcool etílico PA

Fonte: Adaptado de COLPAERT, 2008.

Após a preparação das amostras, as microestruturas das regiões dos cordões de solda foram submetidas a nova análise, desta vez análises micrográficas por meio de um microscópio óptico da marca Shimadzu modelo SSX-550 (ampliação de 100x, 200x, 400x e 800x), equipado com uma câmera e Software, o que possibilitou assim verificar e analisar as microestruturas formadas ao longo das seções da ZF, ZTA e MB

4.6. Ensaios de dureza

4.6.1. Testes de microdureza

O ensaio de microdureza foi realizado em um microdurômetro da marca Shimadzu, modelo HMV2T com dois micrômetros digitais da marca Mitutoyo acoplados ao equipamento, pelo método Vickers, com carga de 500 g e tempo de aplicação de carga de 15 segundos (conforme recomendação da ASTM E92-82).

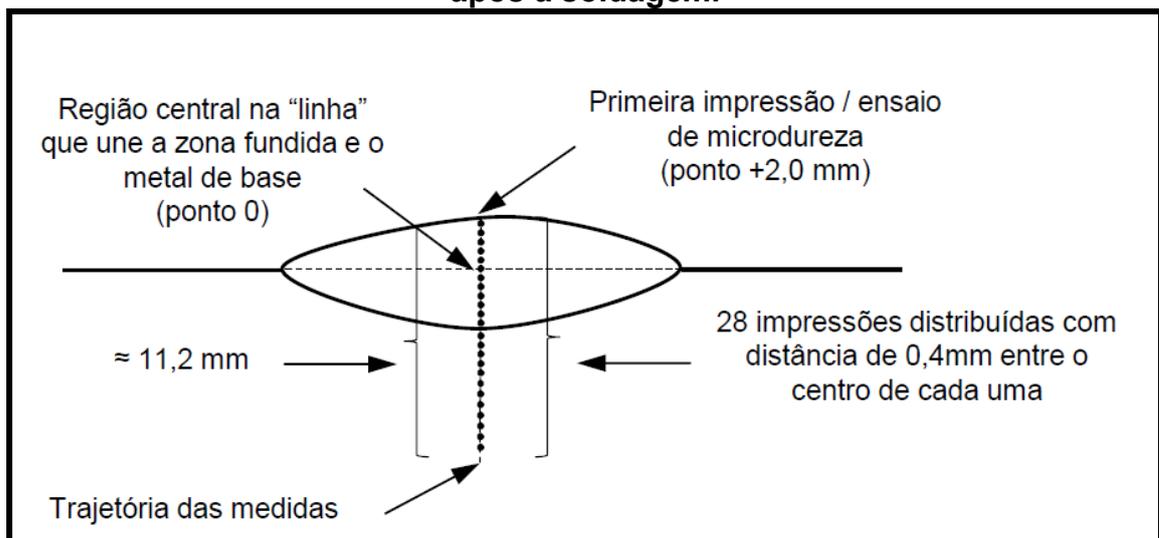
A microdureza foi realizada logo após as análises micrográficas, em todas as

amostras e réplicas, (totalizando 16 corpos de prova) ao longo da seção transversal das amostras soldadas, possibilitando assim a distribuição e obtenção de perfis das propriedades mecânicas do aço SAE 4340. Dessa forma foi possível obter resultados referentes às regiões de maior interesse da soldagem, ou seja, nas zonas referentes a zona fundida, zona termicamente afetada e do metal de base.

Na Figura 4.8 é apresentado de forma esquemática o procedimento e a localização das impressões. Inicialmente, após o posicionamento adequado da amostra, a largura do cordão de solda foi determinada com o auxílio de um dos micrômetros do próprio equipamento e, a partir desta medida, a região central da linha considerada.

Na região central foi realizado o primeiro ensaio de microdureza do total de 28 ensaios ao longo da seção longitudinal do cordão de solda, passando pelas regiões da zona fundida, zona termicamente afetada pelo calor e zona de metal de base, onde 5 destes medidas foram realizadas acima da região central (ZF) e as demais medidas (23) foram realizadas abaixo da mesma, (parte de ZF, ZTA e MB) com distância entre medições de 0,4 mm entre o centro de cada uma delas.

Figura 4.8 - Representações esquemáticas do procedimento e localização das impressões para a obtenção da distribuição da microdureza no aço SAE 4340 após a soldagem.



Fonte: Próprio autor

CAPÍTULO 5

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Introdução

Neste capítulo inicialmente serão apresentados os resultados do ensaio de dureza dos corpos de prova antes dos procedimentos de soldagem e posteriormente serão apresentados os resultados dos efeitos dos parâmetros de entrada estudados, ou seja, corrente de soldagem, velocidade de soldagem e os tratamentos de pré e pós-aquecimento nas repostas geométricas e metalúrgicas das regiões soldadas. A tabela 5.1 apresenta os resultados do ensaio de dureza realizados no metal de base SAE 4340 antes dos procedimentos de soldagem. Esta medição se deu em cinco pontos como já apresentados na figura 4.4. Vale ressaltar que o procedimento da tomada de dureza foi realizada em 3 corpos de prova e que o valor apresentado é a média dos valores encontrados.

Tabela 5.1 - Resultados dos ensaios de dureza (médias)

Ensaio	Dureza (HRB)
Ponto 1	108,0
Ponto 2	106,0
Ponto 3	106,0
Ponto 4	105,0
Ponto 5	107,0
Média	106,4

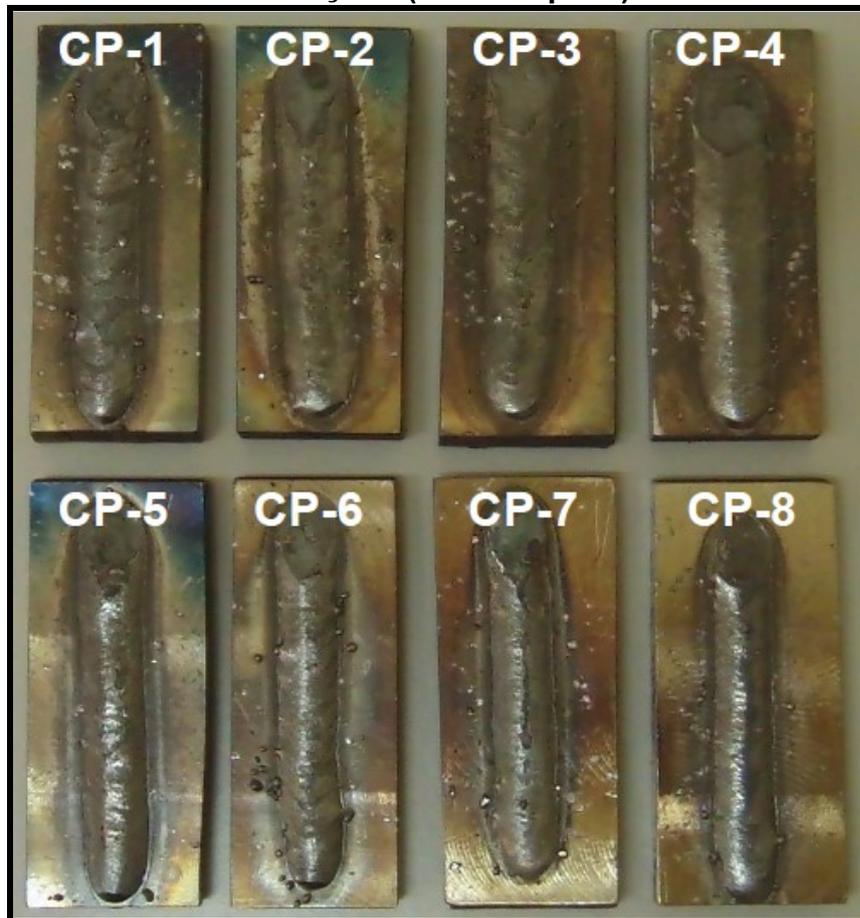
Fonte: Próprio autor.

Dos resultados apresentados na tabela 5.1, observou-se que estes estão bem próximos aos sugeridos em catálogo pelo fabricante (Metal Villares) para aços SAE 4340 temperados e revenidos, os quais variam de 101 a 107 HRB. Esta aproximação entre os valores esperados e os obtidos comprovou que o

procedimento do tratamento térmico de normalização realizado em todas as peças após a operação de corte foi determinante para garantir as propriedades mecânicas originais do metal de base, principalmente nas regiões do corte, que poderiam ter sofrido alguma alteração de dureza devido ao aporte térmico causado pelo processo de corte com maçarico.

A figura 5.1 apresenta os cordões de solda dos 8 corpos de prova soldados conforme condições pré-estabelecidas, na matriz de experimentação.

Figura 5.1 - Corpos de prova aço SAE 4340 após a soldagem das oito condições (sem a réplica).

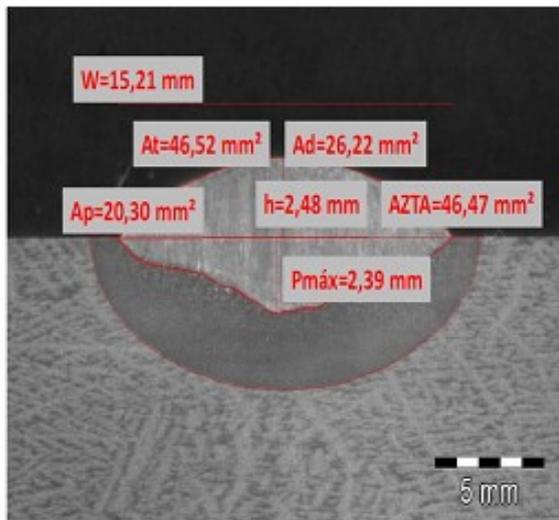


Fonte: Próprio autor.

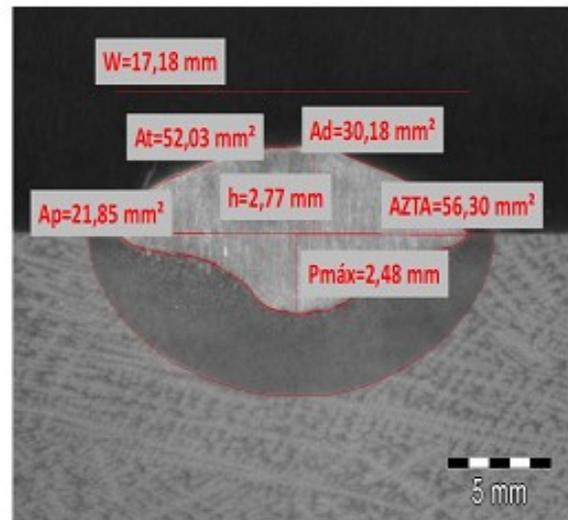
5.2. Avaliação dos parâmetros geométricos dos cordões de solda

Nas figuras 5.2 a 5.5 estão apresentadas as macrografias das regiões soldadas do aço SAE 4340, e os seus respectivos valores (dimensões e áreas) para as condições de soldagem estudadas.

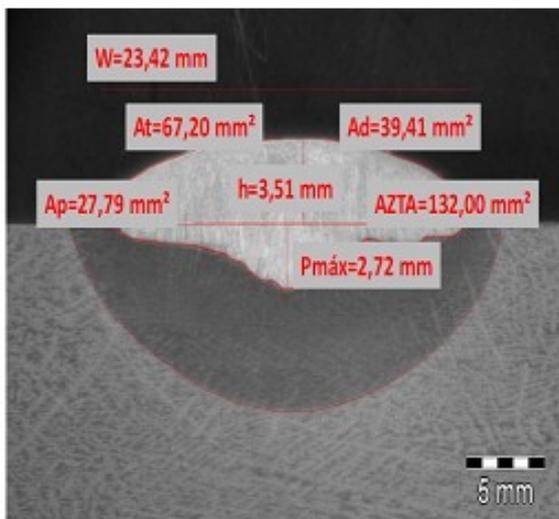
Figura 5.2 - Macrografias dos cordões de solda com as suas respectivas dimensões e áreas – Condições 1 e 5: Soldagem normal (sem pré e sem pós aquecimento)



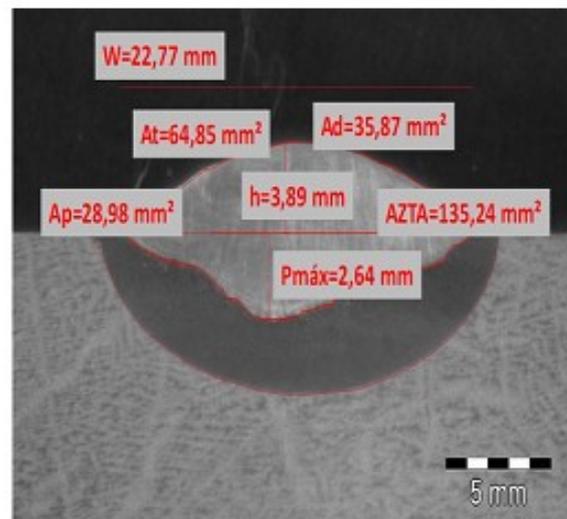
(a)



(b)



(c)

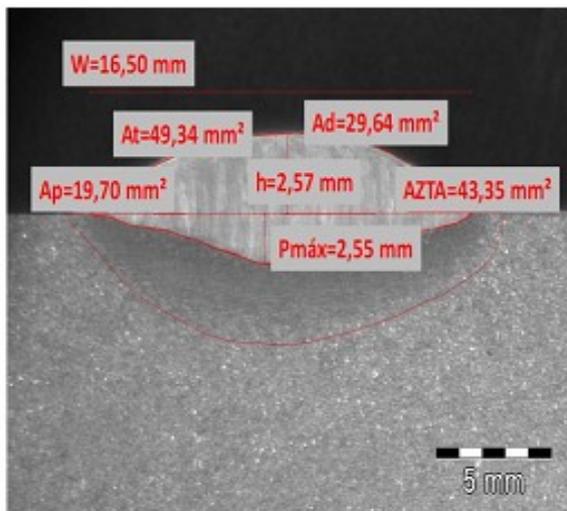


(d)

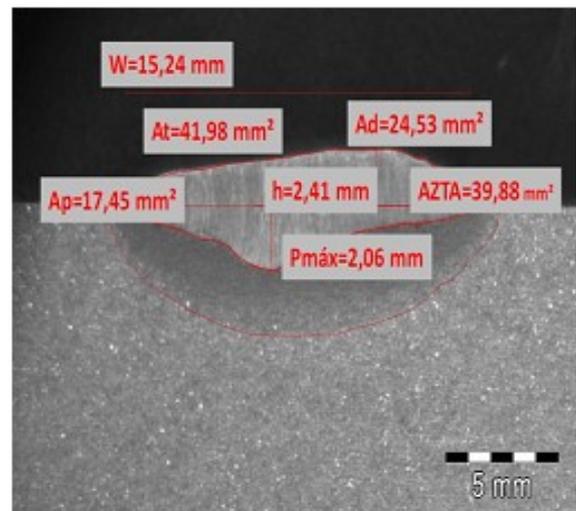
Legenda: Condição 1: Amostra (a) Corrente de 250A e Amostra (b) Réplica da Corrente de 250A; Condição 5 : Amostra (c) Corrente de 290A e Amostra (d) Réplica da Corrente de 290A.

Fonte: Próprio autor.

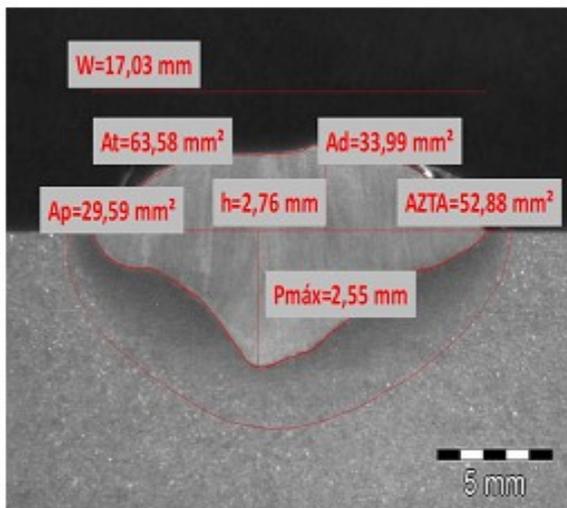
Figura 5.3 - Macrografias dos cordões de solda com as suas respectivas dimensões e áreas – Condições 2 e 6: Soldagem com pós-aquecimento.



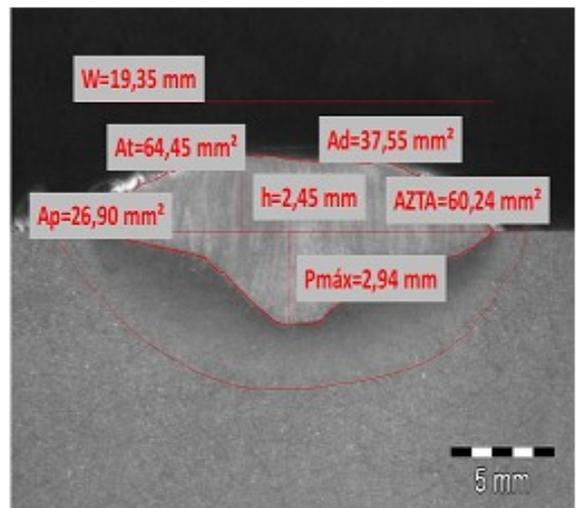
(a)



(b)



(c)

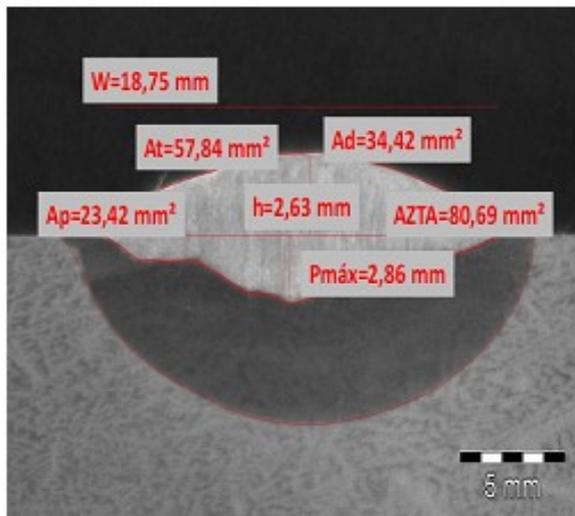


(d)

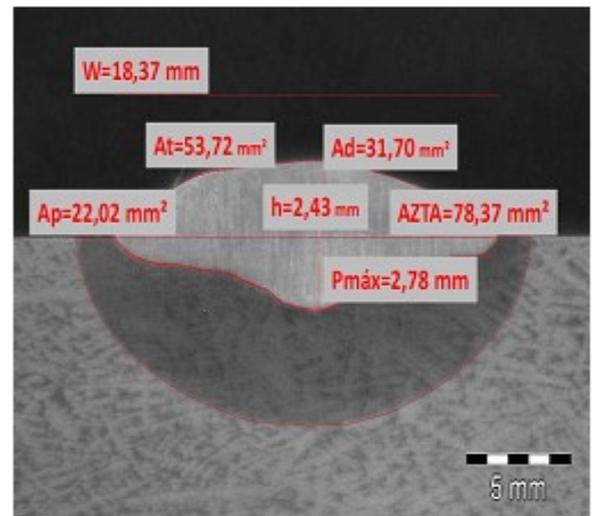
Legenda: Condição 2: Amostra (a) Corrente de 250A e Amostra (b) Réplica da Corrente de 250A; Condição 6: Amostra (c) Corrente de 290A e Amostra (d) Réplica da Corrente de 290A.

Fonte: Próprio autor.

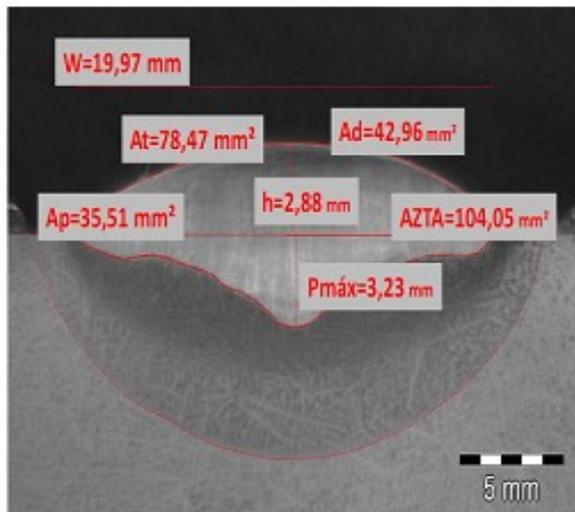
Figura 5.4 - Macrografias dos cordões de solda com as suas respectivas dimensões e áreas – Condições 3 e 7: Soldagem com pré-aquecimento



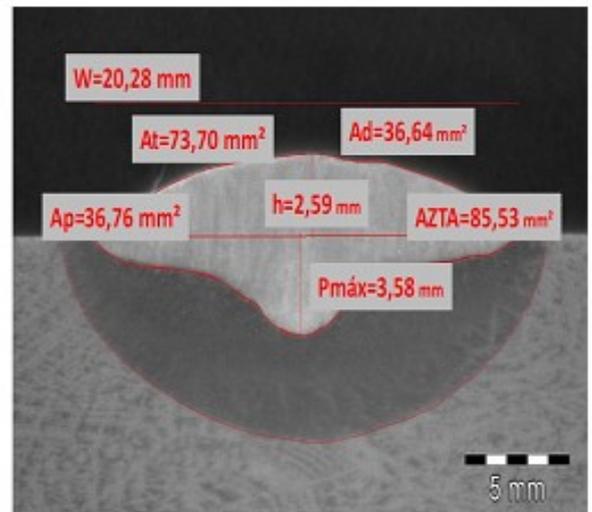
(a)



(b)



(c)

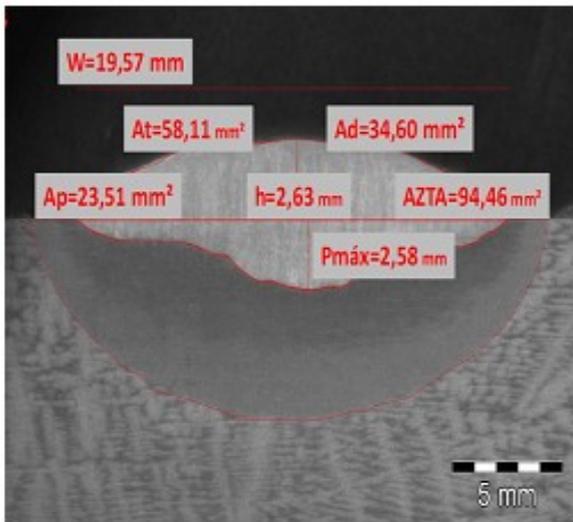


(d)

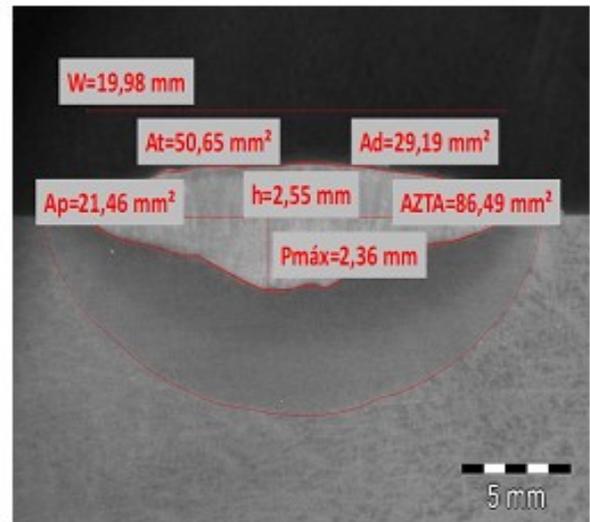
Legenda: Condição 3: Amostra (a) Corrente de 250A e Amostra (b) Réplica da Corrente de 250A; Condição 7: Amostra (c) Corrente de 290A e Amostra (d) Réplica da Corrente de 290A.

Fonte: Próprio autor.

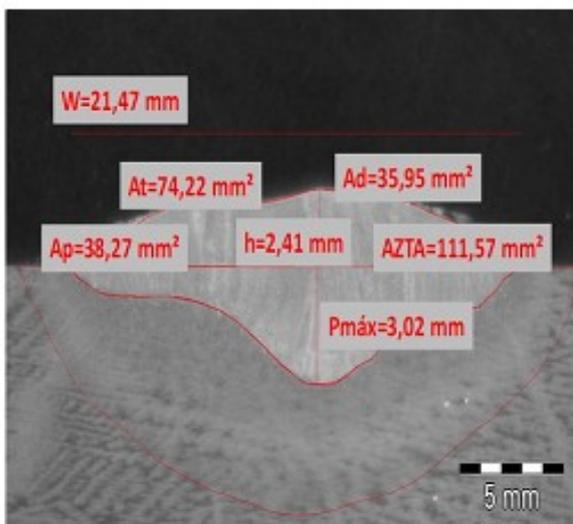
Figura 5.5 - Macrografias dos cordões de solda com as suas respectivas dimensões e áreas - Condições 4 e 8: Soldagem com pré e pós-aquecimento



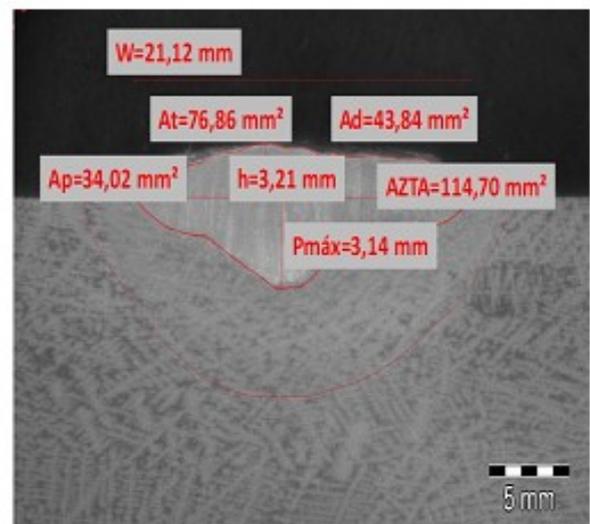
(a)



(b)



(c)



(d)

Legenda: Condição 4: Amostra (a) Corrente de 250A e Amostra (b) Réplica da Corrente de 250A; Condição 8: Amostra (c) Corrente de 290A e Amostra (d) Réplica da Corrente de 290A.

Fonte: Próprio autor.

As tabelas 5.2 e 5.3 apresentam as compilações dos valores das condições e réplicas e os seus respectivos valores médios referentes às dimensões geométricas dos cordões de solda obtidos pela macrografia. Vale ressaltar que todos os parâmetros de soldagem utilizados estão representados nas tabelas 4.6 e 4.7. Já a tabela completa com as variáveis de entrada e resultados dos valores geométricos dos cordões de solda (condição e réplica) está apresentada no Apêndice I.

Para os dados da tabela 5.2 foram utilizados através de um planejamento fatorial 2^3 cuja análise se deu através do software Minitab-R14, que gerou resultados que estão apresentados na tabela 5.4.

Nas figuras 5.4 a 5.9 são apresentados todos os gráficos que foram compilados pelo Software Minitab, comparando os principais fatores que influenciaram diretamente na formação dos cordões de solda e as suas respectivas áreas de interesse.

Tabela 5.2 - Variáveis de entrada e resultados dos valores geométricos dos cordões de solda (ZTA e ZF - Condição e réplica).

Condição	W (mm)	h (mm)	P _{máx} (mm)	A _d (mm ²)	A _p (mm ²)	A _t (mm ²)	A _{ZTA} (mm ²)
1 - 250A (normal)	15,21	2,48	2,39	26,22	20,30	46,52	46,47
	17,18	2,77	2,48	30,18	21,85	52,03	56,30
2 - 250A (pós-aquecimento)	16,50	2,57	2,55	29,64	19,70	49,34	43,35
	15,24	2,41	2,06	24,53	17,45	41,98	39,88
3 - 250A (pré-aquecimento)	18,75	2,63	2,86	34,42	23,42	57,84	80,69
	18,37	2,43	2,78	31,70	22,02	53,72	78,37
4 - 250A (pré e pós-aquec.)	19,57	2,63	2,58	34,60	23,51	58,11	94,46
	19,28	2,55	2,36	29,19	21,46	50,65	86,49
5 - 290A (normal)	23,42	3,51	2,72	39,41	27,79	67,20	132,00
	22,77	3,89	2,64	35,87	28,98	64,85	135,24
6 - 290A (pós-aquecimento)	17,03	2,76	2,55	33,99	29,59	63,58	52,88
	19,35	2,45	2,94	37,55	26,90	64,45	60,24
7 - 290A (pós-aquecimento)	19,97	2,88	3,23	42,96	35,51	78,47	104,05
	20,28	2,59	3,58	36,94	36,76	73,70	85,53
8 - 290A (pré e pós-aquec.)	21,47	2,41	3,02	35,95	38,27	74,22	111,57
	21,12	3,21	3,14	43,84	34,02	77,86	114,70

Legenda: W=Largura do cordão;h=Reforço;P_{máx}=Penetração máxima; A_d=Área depositada; A_p=Área penetração axial; A_t=Área total; A_{ZTA}=Área zona térmica afetada.

Fonte: Próprio autor

Tabela 5.3 - Variáveis de entrada e resultados dos valores geométricos dos cordões de solda (média - Condição e réplica).

Condição	W (mm)	h (mm)	P _{máx} (mm)	A _d (mm ²)	A _p (mm ²)	A _t (mm ²)	A _{ZTA} (mm ²)
1	16,19	2,62	2,43	28,20	21,07	49,27	51,38
2	15,87	2,49	2,30	27,08	18,57	45,66	41,61
3	18,56	2,53	2,82	33,06	22,72	55,78	79,53
4	19,42	2,59	2,47	31,89	22,48	54,38	90,47
5	23,09	3,70	2,68	37,64	28,38	66,02	133,62
6	18,19	2,60	3,63	35,77	28,24	64,01	56,56
7	20,12	2,73	3,40	39,95	36,13	76,08	94,79
8	21,29	2,81	3,08	39,89	36,14	76,04	113,13

Legenda: W=Largura do cordão;h=Reforço; P_{máx}=Penetração máxima; A_d=Área depositada; A_p=Área penetração axial; A_t=Área total; A_{ZTA}=Área zona térmica afetada.

Fonte: Próprio autor

Tabela 5.4 - Estimativas dos efeitos e coeficientes dos fatores nas respostas analisadas.

Fatores e interações	p-value					
	Ad (mm ²)	Ap (mm ²)	A _{ZTA} (mm ²)	W (mm)	h (mm)	P _{máx.} (mm)
Corrente	0,002	0,000	0,000	0,000	0,016	0,001
Pré-aquecimento	0,053	0,000	0,000	0,008	0,192	0,003
Pós-aquecimento	0,571	0,402	0,007	0,099	0,072	0,092
Corrente x Pré-aquec.	0,661	0,014	0,006	0,010	0,0186	0,224
Corrente x Pós-aquec.	0,961	0,444	0,005	0,037	0,112	0,585
Pré-aquec.x Pós-aquec.	0,810	0,477	0,000	0,003	0,033	0,153
Cor. x Pré-aq. x Pós-aq.	0,800	0,532	0,001	0,021	0,103	0,672
R-Sq (adj)	57,61%	93,96%	94,64%	87,75%	61,48%	73,85%

Legenda:A_d=Área depositada; A_p=Área penetração axial; A_{ZTA}=Área zona térmica afetada; W=Largura do cordão;h=Reforço; P_{máx}=Penetração máxima;

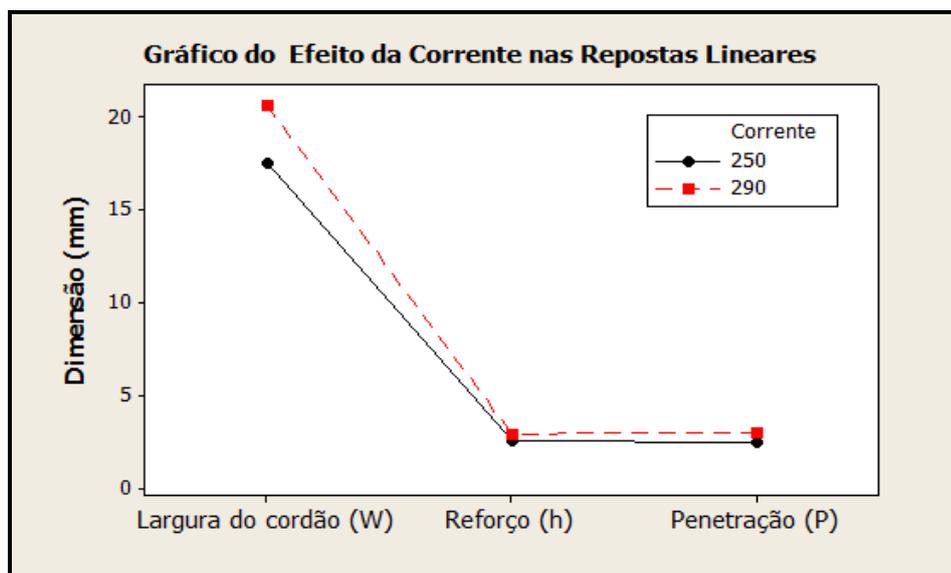
Fonte: Próprio autor

Vale ressaltar que a análise de significância dos parâmetros adotados pelo Minitab, se deu pelos valores do *p-value*, ou seja, valores inferiores a 0,05 (que estão fora da normalidade de 95%) são considerados significativos, pois alteram as respostas entre os níveis estudados. E o ajuste R-Sq(adj) representa a eficácia do planejamento, que segundo a literatura sugere que o planejamento adequado deverá apresentar valores destes índices superiores a 60%.

Portanto, conforme os resultados apresentados na tabela 5.4, verificou-se que o fator corrente teve forte influência nos resultados, afetando diretamente em todos os parâmetros do cordão de solda, devido ao aporte térmico gerado durante a soldagem, conforme pode ser observado nas figuras 5.6 e 5.7.

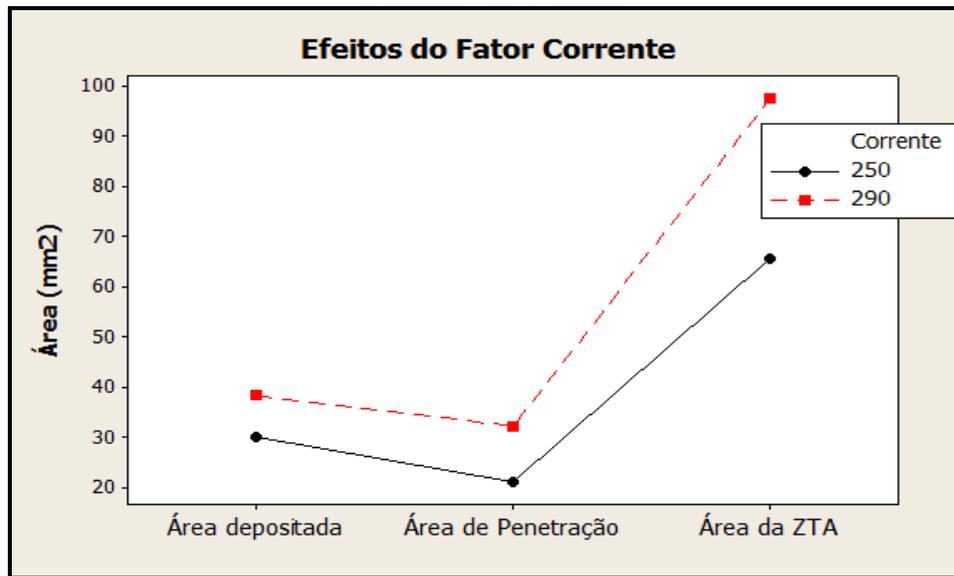
A influência da corrente pode ser mais evidenciada ainda de acordo com os dados da tabela 5.3, principalmente se comparar as soldagens realizadas nas condições de 1 a 4 (corrente de 250 A), em relação as soldagens realizadas nas condições de 5 a 8 (corrente de 290 A), onde percebe-se um aumento bem significativo, como por exemplo, nas condições 1 e 5 (soldagem normal, sem pré e pós-aquecimento), onde o valor médio da largura do cordão (W) teve uma variação de cerca de 42,62% e a ZTA apresentando uma variação de aproximadamente 160,06% .

Figura 5.6 - Influência do fator corrente na formação das dimensões dos cordões de solda.



Fonte: Próprio autor.

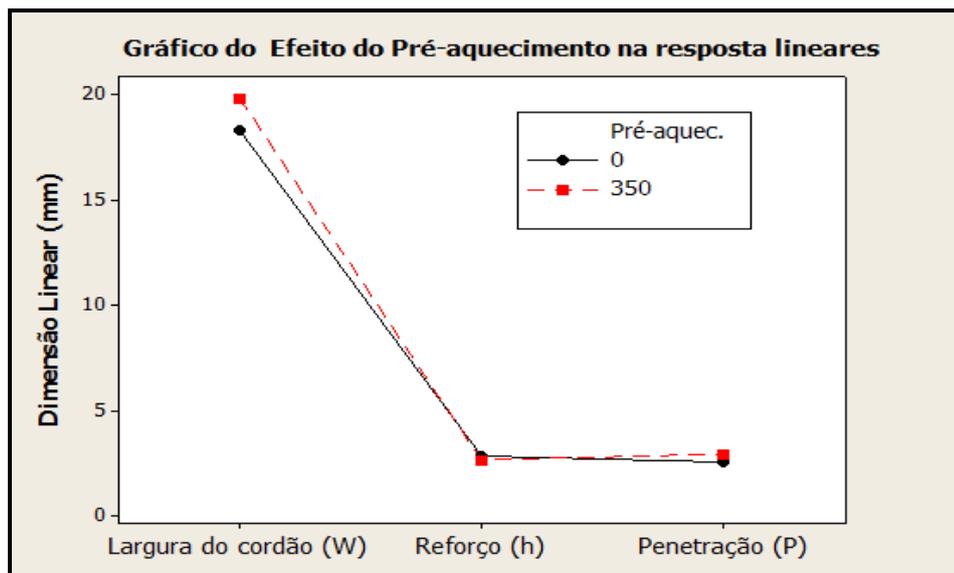
Figura 5.7- Influência do fator corrente nas formações das áreas dos cordões de solda.



Fonte: Próprio autor

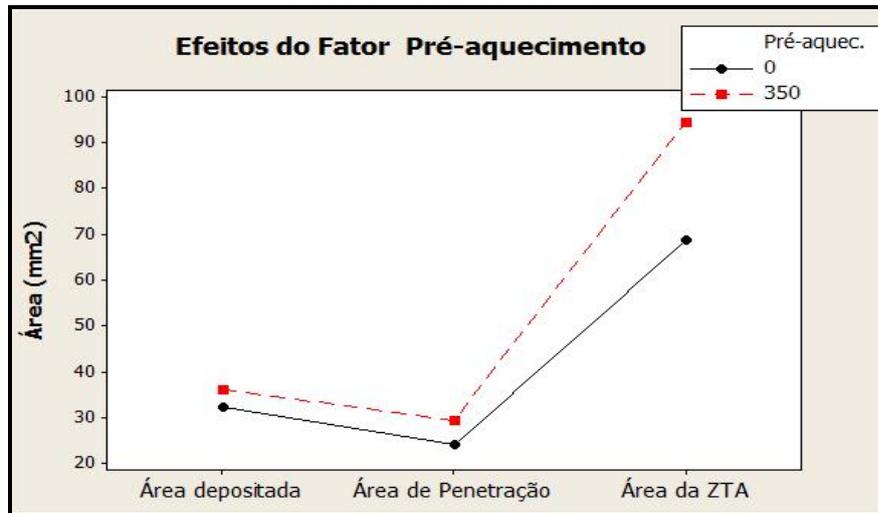
Nas figuras 5.8 e 5.9, são apresentados apenas os efeitos do fator pré-aquecimento nas formações dos cordões de solda.

Figura 5.8 - Influência do fator pré-aquecimento nas formações das dimensões geométricas dos cordões de solda.



Fonte: Próprio autor.

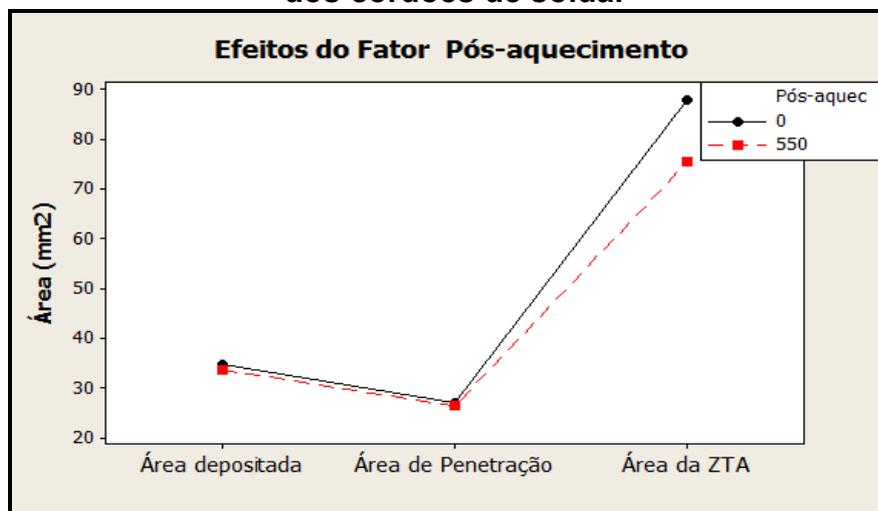
Figura 5.9 - Influência do fator pré-aquecimento nas formações das áreas doscordões de solda.



Fonte: Próprio autor.

Nos gráficos das figuras 5.8 e 5.9 observa-se que o fator pré-aquecimento também teve uma ação importante nas repostas analisadas, que também poder ser comprovado na tabela 5.4 (Minitab), ou seja, os valores obtidos nas áreas de penetração axial (A_p), ZTA, nas dimensões da largura do cordão (W) e penetração máxima do cordão ($P_{máx}$), foram influenciados por este fator (*p-value inferior a 0,05*), isto comprova que a dureza das microestruturas do aço 4340 (como é fornecido) dificulta em parte a soldabilidade deste aço e a ação do pré-aquecimento provavelmente reduziu a tensão residual típica desta estrutura reduzindo assim a dureza e a resistência do material favorecendo a soldagem.

Figura 5.10 - Influência do fator pós-aquecimento nas formações das áreas dos cordões de solda.



Fonte: Próprio autor.

Por outro lado, considerando apenas o fator pós-aquecimento (figura 5.10) pode-se afirmar, com base nos dados da tabela 5.4 que este fator apenas teve influência no crescimento da área da ZTA, o que de certa forma foi uma surpresa, pois a expectativa seria que este apenas agiria na remoção das tensões residuais da ZTA, o que se conclui é que após a soldagem a transformação da ZTA ainda não está completa, demandando algum tempo ainda, e que o pós-aquecimento imediatamente após a soldagem pode também minimizar as transformações de fases.

5.3. Diluição

A tabela 5.5, apresenta os resultados médios (condição e réplica) obtidos pelas macrografias das 8 condições experimentais deste trabalho. Destes valores obtidos, e trabalho, julgou-se oportuno apresentar valores típicos desta respostas para alguns processos de soldagem com finalidade de comparação (tabela 5.6)

Tabela 5.5- Valores médios obtidos (condição e réplica) das dimensões dos cordões para cálculo da diluição.

Amostras	Área penetração (Ap)	Área total (At)	Diluição (%)
Condição 1	21,07	49,27	42,76
Condição 2	18,57	45,66	40,67
Condição 3	22,72	55,78	40,73
Condição 4	22,48	54,38	41,34
Condição 5	28,38	66,02	42,99
Condição 6	28,24	64,01	44,12
Condição 7	36,13	76,08	47,49
Condição 8	36,14	76,04	47,53

Fonte: Próprio autor.

De acordo com tabela 5.5, os valores médios obtidos e calculados entre as condições e réplicas das diluições ficaram acima do valor de pico apresentados por Bohler (2014), conforme tabela 5.6, onde a média de uma diluição obtida em um processo de soldagem por FCAW varia entre 25 a 40%. Este aumento foi mais pronunciado

quando a corrente foi fixada no seu maior valor, o que está de acordo com a literatura maior aporte térmico maior diluição. A justificativa deste aumento pode ser explicado pelo fato de que o material soldado 4340 demandou uma alta taxa de energia para alcançar uma penetração adequada e por isto elevou a diluição. Vale ressaltar também que os valores de correntes sugeridos pelo fabricante dos consumíveis eram de 220 A e que foram utilizados neste trabalho foram de 250A e 290A.

Tabela 5.6 - Diluições típicas por processos de soldagem

Processo	Diluição (%)
Eletrodo Revestido (SMAW)	25-30
TIG (GTAW)	5-15
MIG/MAG (GMAW)	15-30
Arame Tubular (FCAW)	25-40
Arco Submerso (SAW)	50-60
Arco Submerso Fita (SAW)	15-20
Eletroescória Fita (ESW)	8-12

Fonte: BOHLER, 2014.

5.4. Resultados das microdurezas obtidos nos corpos de prova

Nas Figuras 5.11 a 5.14 são apresentadas as durezas Vickers (condição e réplica) e as suas distribuições nos cordões de solda realizados no aço SAE 4340, conforme procedimento representado esquematicamente na Figura 4.8 e a matriz de experimentação apresentadas nas tabelas 4.6 e 4.7.

Vale ressaltar que o resultado de dureza média do material (aço SAE4340) antes da soldagem foi de aproximadamente 310 HV (106,4 HRB), que serve como parâmetro de comparação em relação aos corpos de provas obtidos após as condições de soldagem.

Considerando inicialmente as amostras soldadas na condição normal (sem tratamento térmico) apenas com variação na corrente de soldagem (condição 1:

corrente de 250 A e condição 5: corrente de 290 A), observa-se na figura 5.11 que os valores iniciais de dureza na condição 1 (a partir da posição +2,0mm, na ZF) ficaram um pouco acima da média em relação a dureza inicial (310 HV)), ou seja, por volta de 340 a 350 HV (provavelmente devido ao metal de adição e aporte térmico) tendo novamente uma redução mais acentuada próxima as áreas da ZTA, em torno de 290 e 300 HV (posições -1,2 a -2,0mm).

Por outro lado, na condição 5 houve uma redução da dureza a partir da posição inicial +2,0mm (ZF), apresentando uma dureza média de 230 a 240 HV até a posição de -2,4mm, ficando neste caso abaixo da dureza média (310 HV), mas com extensão maior, devido ao aporte térmico causado pela corrente de 290 A.

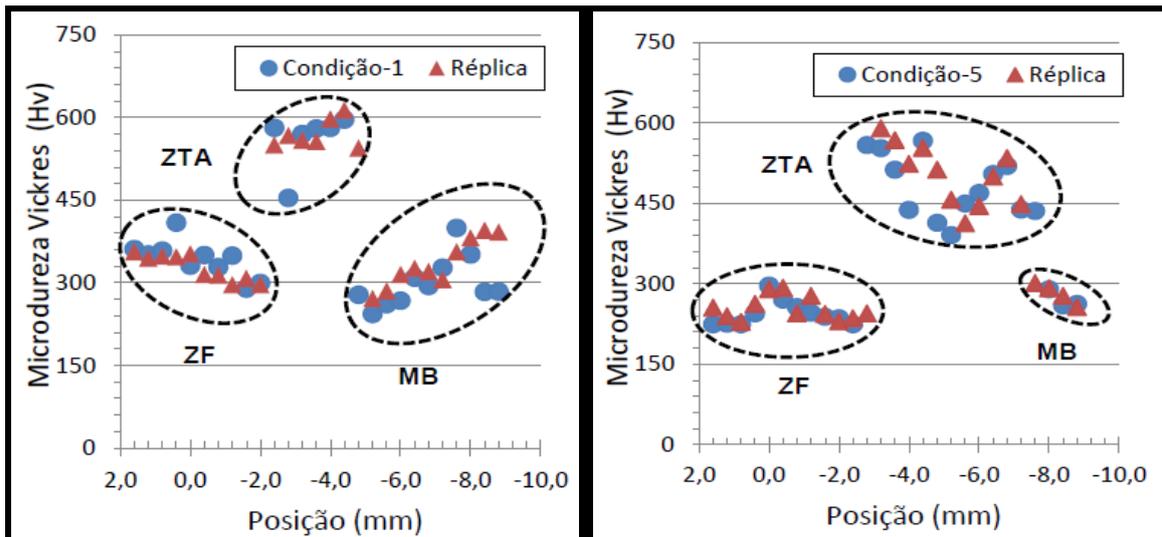
Conforme já esperado, nas regiões da ZTA foram as regiões que obtiveram os maiores níveis de dureza, porém na condição 1 a ZTA, formou-se nas posições de -2,4 a -4,4mm, com uma dureza média de 565 HV. Na condição 5 a extensão ZTA foi bem maior, ocorrendo entre as posições de -2,8 a -7,6mm, porém apresentando uma dureza média menor, ou seja, 491 HV, em comparação a condição-1 (565 HV).

Nas regiões de MB, a condição 1 apresentou uma área muito maior que em comparação a condição 5, apresentando uma variação de dureza média de 324 HV ao final da MB, (pouco acima da média 310 HV) apresentando alguns picos de elevação de dureza considerada fora do normal, uma vez que deveria haver uma redução e não elevação da mesma (entre as posições -7,6 e -8,4mm, com média de dureza entre para 395 a 399 HV) e em seguida para uma nova redução de dureza por volta de 290 HV na posição -8,8mm). Já na condição 5 o MB formou-se apenas em um pequeno trecho (posição de -7,6mm a 8,8mm) com uma dureza média de 260 a 290 HV, devido ao maior aporte térmico.

Nas amostras que foram submetidas a tratamento depois da soldagem (pós-aquecimento), condições 2 e 6, pode-se perceber uma redução de dureza considerável nas zonas da ZTA, em comparação as condições de soldagem normal (1 e 5) ou seja, na condição 2 a dureza média foi de aproximadamente 370 HV, enquanto que na condição 6 a dureza média obtida na ZTA foi de 355 HV. Nas

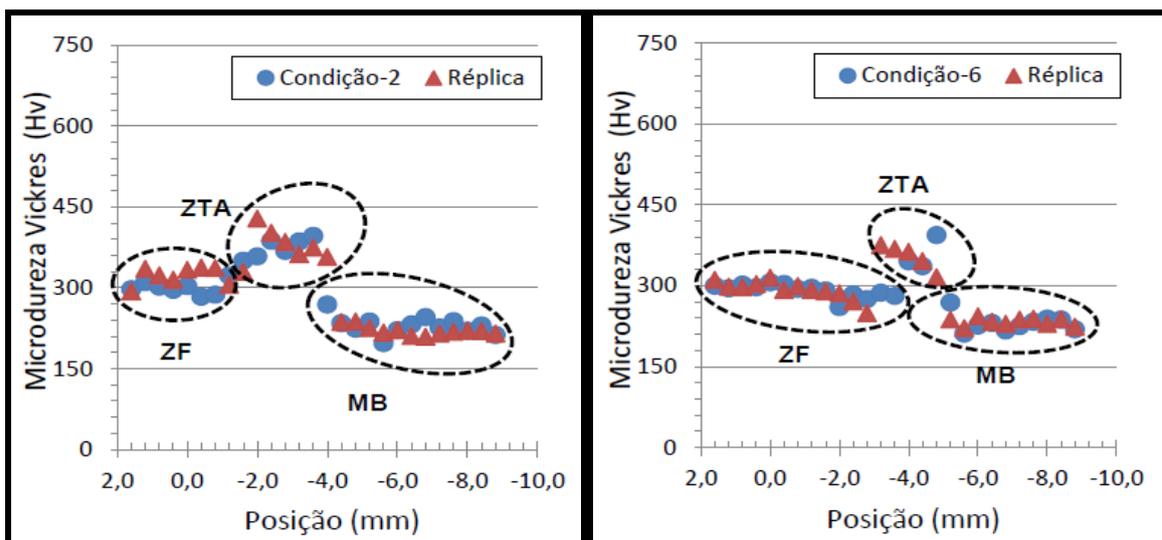
regiões da ZF e MB, as durezas médias dessas regiões ficaram entre 290HV e 230 HV, onde podemos comprovar que o fator pós-aquecimento foi determinante, na redução da área da ZTA, conforme pode ser visto na figura 5.12.

Figura 5.11- Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados na condição 1 (corrente de 250 A) e condição 5 (corrente de 290 A).



Fonte: Próprio autor.

Figura 5.12- Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados na condição 2 (corrente de 250 A) e condição 6 (corrente de 290 A).

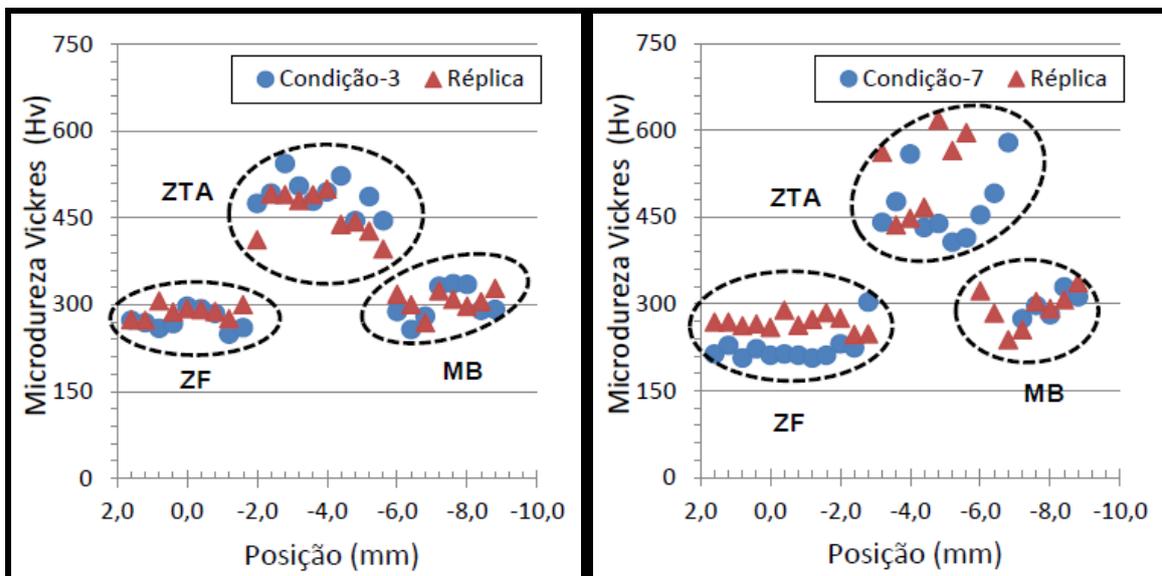


Fonte: Próprio autor.

Nas condições 3 e 7 (figura 5.13), onde foram realizados apenas o tratamento térmico antes da soldagem (pré-aquecimento), observa-se uma ligeira redução de dureza na região da ZF, onde na condição 3, obteve-se uma dureza média de 281 HV, já por

outro lado, na condição 7 houve uma redução de dureza um pouco mais significativa, apresentando uma dureza média de 246 HV. Nas regiões da ZTA, pode-se comprovar que o pré-aquecimento não contribuiu para redução da dureza, ou seja, a dureza média alcançada ficou bem superior a média (310 HV), alcançando valores de pico de 544 HV (condição 3) e 618 HV (condição 7), provavelmente devido ao aporte térmico, espessura da chapa soldada e principalmente por se tratar de uma soldagem em aço muito endurecível. Já na região de MB, não houve resultados expressivos, ou seja, a dureza apresentada ficou em torno de 290 a 310 HV, dentro da média desejada.

Figura 5.13 - Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados na condição 3 (corrente de 250 A) e condição 7 (corrente de 290 A).

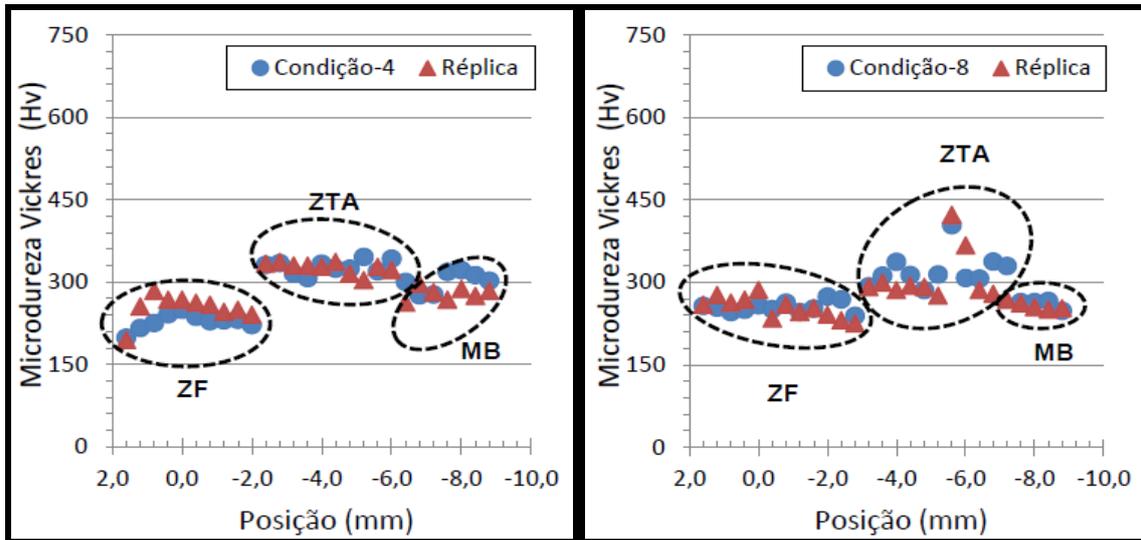


Fonte: Próprio autor.

Já nas condições 4 e 8, condições onde foram realizados tratamentos térmicos, antes e após a soldagem (pré-aquecimento e pós-aquecimento). Os resultados obtidos apresentaram as variações de durezas mais estreitas, ou seja, as variações de durezas obtidas ao longo das regiões de interesse de estudo, tiveram pequenas variações.

Na condição 4, por exemplo, a dureza média obtida nas regiões da ZF, ZTA e MB, foram de 235 HV, 326 HV e 289 HV, respectivamente, já na condição 8, as durezas médias obtidas nas regiões da ZF, ZTA e MB, foram de 254 HV, 311 HV e 259 HV, respectivamente. Conforme pode ser observado na figura 5.14.

Figura 5.14 - Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados na condição 4 (corrente de 250 A) e condição 8 (corrente de 290 A).



Fonte: Próprio autor.

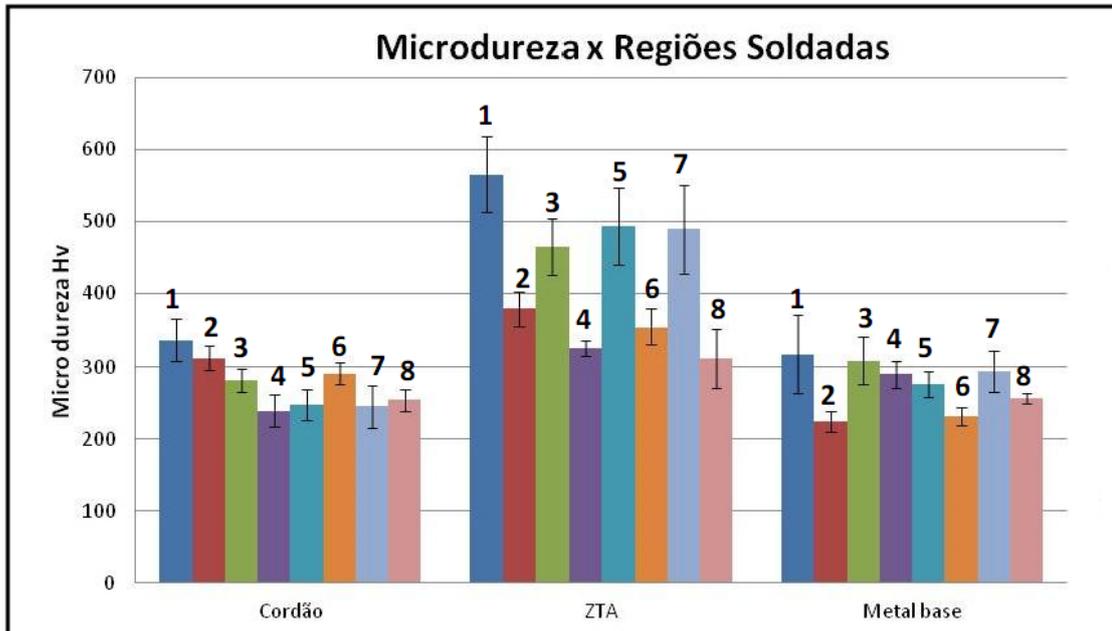
Portanto, pode-se afirmar que nas condições de soldagem 4 e 8 foram as que apresentaram os valores de dureza mais satisfatórios, com pequenas variações de durezas ao longo das regiões de interesse de estudo, principalmente nas regiões da ZTA, consideradas mais críticas, onde as durezas obtidas nessas regiões ficaram muito próximas das durezas obtidas antes da soldagem.

Para resumir a gama de informações da resposta microdureza nas 8 condições experimentais elaborou-se um gráfico com os valores médios das condições e réplicas nas regiões do cordão, da ZTA e metal base. Conforme apresentado na figura 5.15.

Dos valores apresentados na figura 5.15 pode-se observar que as condições em que há presença do pós-aquecimento, indiferentemente se a corrente está alta ou baixa provocaram valores de dureza na ZTA bem próximos ao do metal base e do cordão, o que comprova que a utilização do tratamento de pós-aquecimento é imprescindível para minimizar a presença de martensita com alto grau de tensão residual.

Como a corrente gerou os melhores resultados quando utilizada no seu maior nível, espera-se comprovar nas próximas análises que esta quando utilizada na condição de maior energia não provocou o surgimento de fissuras nas microestruturas. No apêndice II (páginas, 99 e 100) são apresentados todos os valores de microdureza obtidos ao longo dos cordões de solda.

Figura 5.15 - Valores médios de microdureza para todas as condições experimentais



Legenda: (1) condição: Soldagem normal (sem tratamento) -250A; (2) condição: pós-aquecimento - 250A; (3) condição: pré-aquecimento - 250A; (4) condição: pré e pós-aquecimento - 250A; (5) condição: Soldagem normal (sem tratamento) - 290^a, (6) condição: pós-aquecimento - 290A; (7) condição: pré-aquecimento - 290A; (8) condição: pré e pós-aquecimento - 290A.

Fonte: Próprio autor.

5.5.Avaliação Micrográfica dos cordões de solda

Com base nos dados obtidos das microdurezas ao longo das 8 condições de soldagem realizadas, foi realizado uma avaliação micrográfica nas amostras que obtiveram um menor e maior percentual de dureza, com intuito de comparar as microestruturas formadas ao longo das regiões de interesse e mesmo tempo verificar se as amostras soldadas apresentaram algum tipo de fissuras ou trincas.

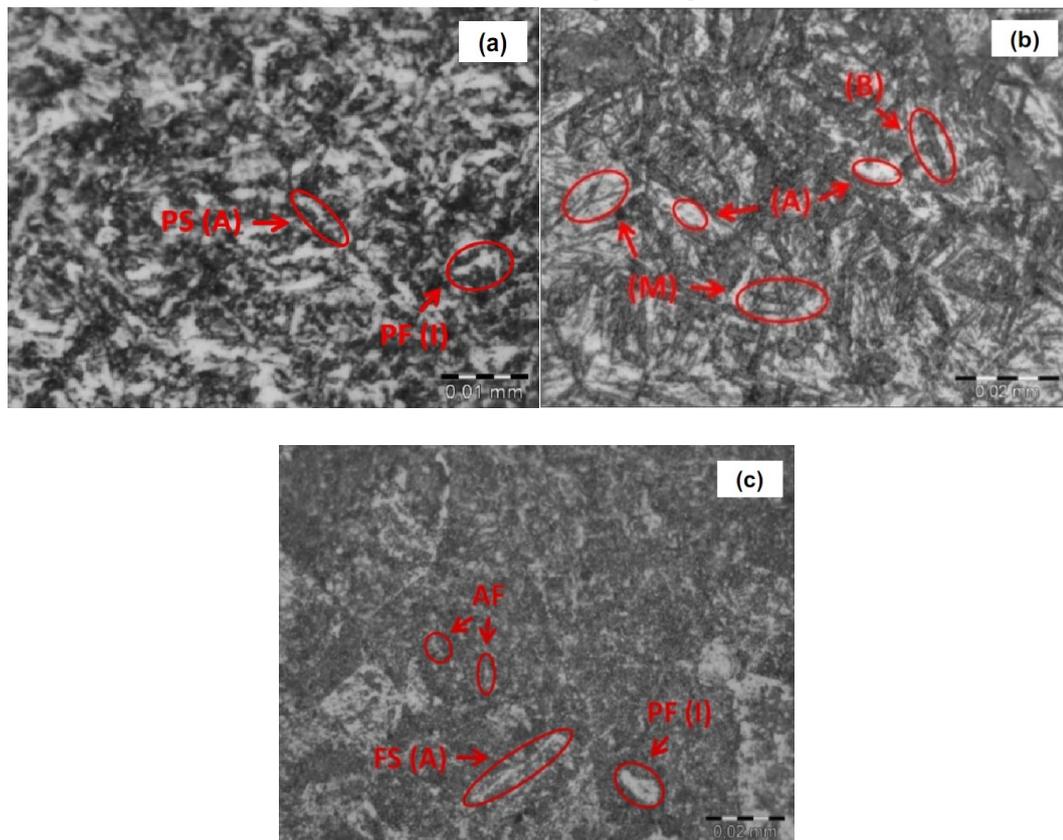
Na ZF (figura 5.16a) apresenta formações de ferrita poligonal intergranular (PF) (I) e ferrita de segunda fase alinhada FS (A) e também a perlita (P) parte mais escura.

Na figura 5.16b, região da ZTA, observa-se uma formação de uma estrutura predominante de martensita (M) com traços de formação de bainita (B) e fundo

branco representado por uma parte da austenita retida (A), o que explica o aumento da dureza obtido nesta região.

Já na figura 5.16c, região de MB, apresenta a formação grãos mais finos de ferrita de segunda fase alinhada (FS) (A) e ferrita acicular (AF), com traços de ferrita poligonal intergranular (PF) (I) e parte mais escura perlita (P).

Figura 5.16 - Micrografias do aço SAE 4340 nas áreas: zona fundida, termicamente afetada e metal de base - corpo de prova soldado na condição 1.



Legenda: (a) Área da zona fundida; (b) Área da zona da ZTA; (c) Área do metal de base

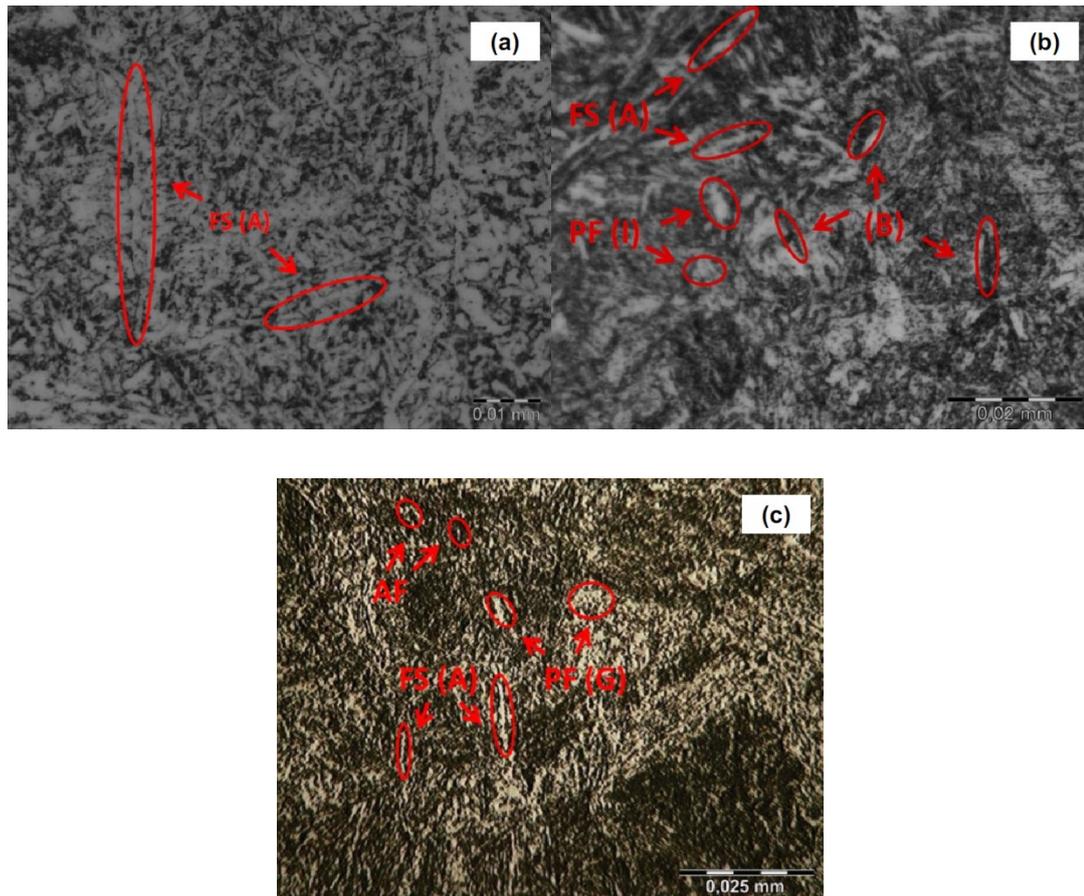
Fonte: Próprio autor.

Na condição de soldagem 4 (- + +) região da ZF (figura 5.17a), as microestruturas predominantes são de ferrita com segunda fase alinhada FS (A), ou ferrita de Windmanstatten e perlita (P), região mais escura (preta).

Na figura 5.17b, região da ZTA, observa-se uma formação de uma estrutura predominante de ferrita de segunda fase alinhada (FS) (A) e ferrita poligonal intergranular (PF) (I), com traços de formação de bainita (B).

Na região de MB, observa-se a formação grãos mais finos de ferrita com segunda fase alinhada (FS) (A) e ferrita acicular (AF), com traços de ferrita poligonal intergranular (PF) (I) e região mais escura (preta) formada pela perlita (P) (figura 5.17c).

Figura 5.17 - Micrografias do aço SAE 4340 nas áreas: zona fundida, termicamente afetada e metal de base - corpo de prova soldado na condição 4.



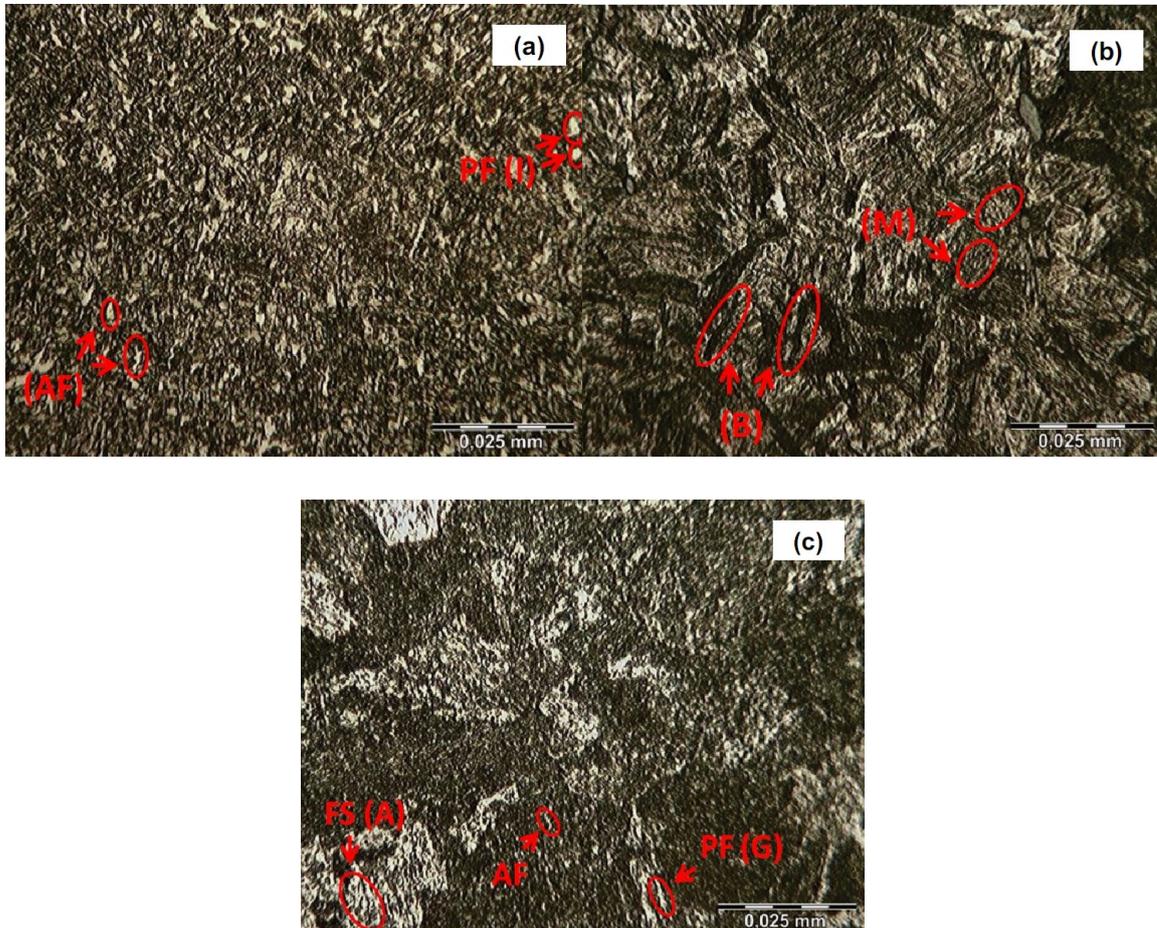
Legenda: (a) Área da zona fundida; (b) Área da zona da ZTA; (c) Área do metal de base

Fonte: Próprio autor.

Nas figuras 5.18a a 5.18c, são apresentadas algumas fotomicrografias do aço SAE 4340, soldada na condição 5 (+ - -). Observa-se na área da ZF a presença predominante de ferrita acicular (AF), ferrita poligonal intergranular (PF) e a parte escura perlita (P)(figura 5.18a). Na área da ZTA (figura 5.18b), observa-se a formação predominante de martensita (M), bainita (B) e parte da austenita retida (região branca), o que justifica os altos valores de dureza obtidos. Já na área do MB, apresenta a formação de ferrita acicular (AF) e ferrita de segunda fase alinhada, também conhecida por ferrita de Windmanstatten (FS) e também ferrita poligonal

intergranular (PF), conforme apresentado na figura 5.18c.

Figura 5.18 - Micrografias do aço SAE 4340 nas áreas: zona fundida, termicamente afetada e metal de base - corpo de prova soldado na condição 5.



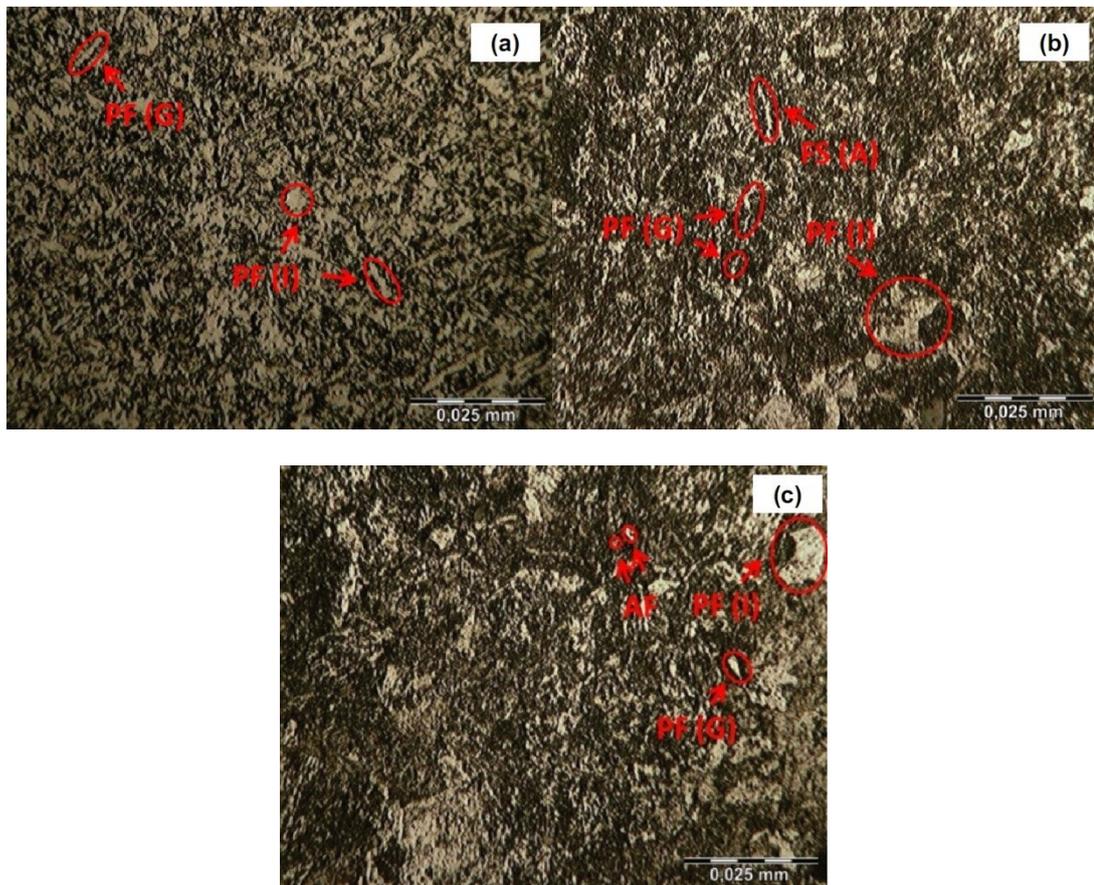
Legenda: (a) Área da zona fundida; (b) Área da zona da ZTA; (c) Área do metal de base
Fonte: Próprio autor.

Nas figuras 5.19a a 5.19c, são apresentadas as fotomicrografias do aço SAE 4340, soldada na condição 8 (+ + +). Na figura 5.19a, (área da ZF), observa-se a presença das formações predominantes de ferrita acicular (AF), ferrita poligonal intergranular (PF) (I) além da ferrita de contorno de grão (PF)(G) e perlita (P) parte escura (marron). Na área da ZTA (figura 5.19b), observa-se que não houve a formação de martensita. Acredita-se que foi devido ao pré e pós aquecimento realizado no cordão de solda, ou seja, praticamente mantendo-se a mesma formação na ZF (figura 5.19a), com exceção da formação de alguns traços de ferrita com segunda fase alinhada (FS) (A) e tamanho de grãos.

Na área do MB, observa-se que praticamente não houve variações microestruturais consideráveis em relação às outras regiões do cordão de solda, principalmente em

relação a área da ZTA. Mas por outro lado, percebe-se uma formação de grãos mais grosseiro, o que explica a queda de dureza em relação a dureza do material original, antes da soldagem. Conforme apresentado na figura 5.19c.

Figura 5.19 - Micrografias do aço SAE 4340 nas áreas: zona fundida, termicamente afetada e metal de base - corpo de prova soldado na condição 8.



Legenda: (a) Área da zona fundida; (b) Área da zona da ZTA; (c) Área do metal de base
Fonte: Próprio autor.

Vale ressaltar que em todas as condições de soldagem utilizadas neste trabalho, não houve evidências de surgimento de fissuras ou trincas, embora tenha sido comprovado o surgimento de fases duras na ZTA, como a martensita e bainita, nas condições de soldagens 1 e 5.

6. CONCLUSÕES

Conforme os parâmetros de soldagem e tratamentos térmicos realizados antes e após a soldagem, avaliados neste trabalho, e em função dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- O aporte térmico causado pela soldagem nas condições de corrente mais elevada (290A) influenciou diretamente o aumento das dimensões e áreas dos cordões de solda em comparação a soldagem nas condições de corrente mais baixa (250 A);
- O tratamento térmico de pré-aquecimento realizado antes da soldagem, nas condições de soldagem com corrente mais baixa (250 A) e mais alta (290 A), levaram a comportamentos distintos, ou seja, na soldagem com corrente de 250 A, favoreceu o crescimento das dimensões e áreas dos cordões, principalmente na área da ZTA, com exceção na largura do cordão que teve um aumento expressivo em comparação a soldagem normal. Por outro lado, na condição soldagem com corrente mais elevada (290 A), houve uma redução em praticamente todas as dimensões das áreas do cordão de solda, inclusive em relação à largura do cordão, em comparação a soldagem normal (sem tratamentos térmicos) para a mesma condição de corrente de soldagem.
- Nas condições de soldagem para corrente de 250 A e 290 A, onde foram realizados apenas o pós-aquecimento, foram obtidos valores bem parecidos nas regiões da ZF, ZTA e de MB. Na ZTA, os resultados também foram satisfatórios, com valores médios de dureza um pouco acima dos valores do material original (antes da soldagem), também em ambas as situações não foi observada a presença da formação da martensita.
- Na soldagem com corrente de 250 A e 290 A, com tratamentos térmicos de pré e pós-aquecimento, formou-se uma área de ZTA muito extensa, em comparação as outras condições de soldagem. Mas por outro lado, não ocorreu alteração de forma significativa a dureza da região, ficando com uma dureza um pouco acima da dureza do material antes da soldagem. Neste

caso, formando uma microestrutura predominante de ferrita acicular, o que é muito bom para um cordão de solda, devido a sua alta tenacidade. Também houve uma redução de dureza razoável nas regiões da zona fundida e metal de base, que pode ser observada pela microestrutura predominante de ferrita acicular, porém de grãos mais grosseiros.

- Nas condições de soldagem normal (250 A e 290 A), apresentaram os maiores valores médios de dureza, respectivamente. Principalmente na região mais crítica da soldagem (ZTA), onde se verificou a formação da microestrutura martensítica, em formatos de agulhas, com fundo branco de austenita retida, o que reflete em uma solda muito dura e frágil.
- Outro fator importante verificado pelas análises micrográficas foi que nenhuma das condições de soldagem utilizadas apresentou fissuras ou trincas superficiais, o que pode-se concluir que a corrente pode ser utilizada no nível maior com presença do pré e pós-aquecimento.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Fazer testes de soldagem usando outro tipo de eletrodo.
- Fazer testes de soldagem utilizando processo de soldagem GMAW.
- Fazer testes de soldagem com abertura de chanfros com solda de passe.
- Fazer testes de soldagem utilizando soldagem com pulso.
- Fazer testes de ensaios de tração.
- Fazer testes de ensaios de impacto.
- Fazer ensaios de ultrassom.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLA, A. J; HASHIMOTO, M. S; ANAZAWA, R. M. Formação da fase bainítica em aços de baixo carbono. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**, São José dos Campos, v. 25, n. 3, 175-181, set. 2006.

AGUIAR, W.M. **Soldagem do aço ABNT 4140 sem tratamento térmico posterior**. 2001. 96f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia e Ciências de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2001.

AZEVEDO, A.G.L. **Aplicação da Técnica da Dupla Camada na Soldagem do Aço ABNT 1045**. 2002. 108f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Engenharia e Ciências de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2002.

ASM. Metals Handbook. Heat Treating of Steels. v.4, 10 ed. Ohio, 1991.

ASM. Metals Handbook. Weldability of Steel. v.6, 10 ed. Ohio, 1992.

AWS. **Weldability, Welding Metallurgy, and Welding Chemistry**. 1995.

AWS, Welding Handbook, Miami, v.4, p.233-332, 1998.

BAILEY, N. **Weldability of ferritic steels**. Abington publishing, England, 1994, 275p.

BARBEDO, N. D. D. **Avaliação comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW utilizando aço ASTM A-36 para verificar a soldabilidade, propriedades metalúrgicas e geométricas, e resistência mecânica**. 2011. 82f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2011.

BARRA, S. ET. AL. Aspectos Metalúrgicos do Processo MIG com Pulsação Térmica: Efeito da Frequência e do Ciclo de Trabalho. In: XXVIII CONSOLDA, São Paulo, Novembro. 2002.

BOEHME, D. "Welding gases – physical properties, the basics for development and optimum application of shielding gases and gas mixtures", IIW document XII-1197-90, 1990.

BÖHLER WELDING GROUP. Acervos Soldagem. Disponível em: <<http://www.inspetordesoldagem.com.br/diluicao/>>. Acesso em: 25 ago. 2014.

BONACORSO, N.G.; DUTRA, J.C.; HEMMER, M.H. Desenvolvimento de uma Célula de Fabricação Automatizada para Soldagem GMAW dos Componentes Estruturais das Rodas Metálicas de Tratores Agrícolas. In: XXXVII CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM, CONSOLDA 2011, Natal.

BONANNI, C.G. **Uso combinado das técnicas DOE e simulação Monte Carlo em um processo de soldagem MIG/MAG pulsado**. 2005. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI, Itajubá, 2005.

BRACARENSE, A.Q. **Apostila e anotações de aula**. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, 2005.

CALLISTER, Willian D. Jr. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 7.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 708p.

CAMPOS, P, T. **Caracterização mecânica e microestrutural de juntas soldadas pelos processos MIG/MAG (GMAW) e arame tubular (FCAW)**. 2005. 75f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2005.

CARRY, H.B.; HELZER, S.C. **Modern welding technology**. New Jersey: Prentice Hall, 2004, 715p.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia dos Materiais**. 2. ed. v.3. São Paulo: McGraw-Hill, 1986. 388p.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 3 ed. Sumaré, São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2008. 412p.

DUTRA, J.C. **Manual da fonte de soldagem inversal 450**. Universidade Federal de Santa Catarina, 1996.

DUTRA, J. C. Soldagem Insp. MIG/MAG– **Tranferênciametálica por Curto-Circuito: fontes de Soldagem versus Gases do arco**. São Paulo, v.13.n.1, p.19-24, jan/mar. 2008.

ESAB.Mig Welding Handbook – ESAB Welding & Cutting Products, 2005.

FBTS. **Curso de Inspetor de Soldagem**. Fundação brasileira de tecnologia da soldagem, 2000.

FLEMINGS, M. C. Solidification Processing; Met Trans 5 (10): 2121-2134, out. 1994.

FORTES, C. **Apostila Arames Tubulares**, ESAB BR, 2004. 103p.

GODOY, J. M.; CAVALHEIRO, B. C.; SALANI, M. Tenacidade na junta soldada de aços API-DNV, fabricados por laminação controlada seguida de resfriamento acelerado. **Conferência de Tecnologia de Soldagem e Inspeção**, Centro de Tecnologia, 2008.

GOMES, E.B. **Análise do comportamento da soldagem porcurto-circuito aplicado ao processo eletrodo tubularatravés da metodologia Taguchi**. 2006. 119f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI, Itajubá, 2006.

HILTON, D.E.; NORRISH, J. Shielding gases for arc welding.**Welding e Metal fabrication**, Cambridge, p.189-196, may/june. 1988.

HUMPHREYS, F. J. Review – Grain and subgrain Characterization by Electron Backscatter diffraction. **Jornal of Materials Science**, v.36, p.3833-3854. 2001.

IRVING, B. Shielding Gases are the key to innovations in welding, **Welding Journal**, p.37-41, Jan.1999.

KAÇAR, R.; KOKEMLI, K. **Effect of controlled atmosphere on MIG/MAG arc weldment properties**. Material & Design. Surrey, n. 26, p.508-516, 2005.

KIEFER, J. H. Bead tempering effects on FCAW heat-affected zone hardness, **Welding Journal**, v.74, p.363-367, 1995.

KOÇAK, M. Structural integrity of welded structures: Process-property-performance relationship. **63rd annual assembly & International Conference of the International Institute of Welding**. Istanbul: [s.n].2010.

KOU, S. **Welding Metallurgy**. 1ed. New York: John Wiley & Sons, 1987. 411p.

LANCASTER, J. F. Metallurgy of welding Abington. William Andrew, 1999. 446p.

LIMA, E. G.; FERREIRA, F. J.; REIS, L. P. S. COBAXO, R. ANDRADE, W. C. Estudo da influência dos parâmetros de soldagem do processo eletrodo tubular na dureza da ZTA de um aço CrMo. **Revista on-line**, UNILESTE, v.2, n.2, jul/dez. 2004.

MACHADO, I.G. Soldagem & Técnicas Conexas: Processos. Porto Alegre: Editado pelo autor, 2007, 477p.

MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J.; BRACARENSE, A.Q. **Soldagem fundamentos e tecnologia**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009. 362p.

MATSUDA, F.; NAKAGAWA, H.; NAKATA, R. Effect of electromagnetic stirring on weld solidification structure of aluminum alloys (Report I) – Investigation on GTA weld metal of thin sheet. **JWS**, v.7, n.1, p.111-127. 1978.

MODENESI, P. J. **Transferência de metal na soldagem GMAW** - Manual aula prática, UFMG. Belo Horizonte, 2004.

MODENESI, P.J.; MARQUES, P.V. **Soldagem I: Introdução aos processos de Soldagem** . Belo Horizonte: Editora UFMG, 2006. 54p.

MOREIRA, A. F. **Influência da atmosfera protetora no cordão de solda obtido através dos processos de soldagem GMAW e FCAW**. 2008. 147f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

MOYER, N. The evolution of shieldinggas. **Welding Journal**, p. 5-52, Sept. 2002.

NUNES, E, B.; MOTTA, M. F.; ABREU, H. F. G.; FARIAS, J. P.; MIRANDA, H. C.; JUNIOR, F. N. A. Estudo dos efeitos da restrição na microestrutura e tenacidade em juntas soldadas em inoxidável duplex. **Soldagem & Inpeção**. São Paulo, v.16, n.2, p.156-164, abr/jun. 2011.

OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C. **Engenharia de soldagem e aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 1982. 461p.

PUKASIEWICZ, A. G. M.; HENKE, S. L.; CASAS, W. J. P. Influência do tratamento pós-soldagem na propagação de trincas por fadiga em juntas soldadas do aço inoxidável martensítica macio CA6NM. **Soldagem Insp**. v.10, n.3, jul/set 2005.

QUITES, A.M. **Introdução a soldagem a arco voltaico**. Florianópolis: Soldasoft, 2002, 352p.

REDDY, G. M.; MOHANDAS, T. Explorative studies on grain refinement of ferritic stainless stel welds. **Journal of materials Science letters** **20**, p.721-723. 2001.

RESENDE, A. **Mapeamento paramétrico da soldagem GMAW com arames de aço inoxidável ferrítico e austenítico**. 2007. 127f. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Metalurgia e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Belo Horizonte, 2007.

SANTANA, I.J.; MODENESI, P.J. Modelagem do processo de soldagem GMAW – transferência por vôle livre. **Soldagem & Inspeção**. (impr.) v.16 n.3, São Paulo, Jul/set.2011.

SANTOS NETO, N.F. **Caracterização de soldas em aços API 5L com diferentes arames tubulares e temperaturas de preaquecimento**. 2003.99f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG**. São Paulo: Artliber Editora, 2008, 284p.

SHACKELFORD, J. F. **Introdução à Ciência dos materiais**. 6ª ed. São Paulo: Pearsons Prentice Hall, 2008, 556p.

SILVA, C.V.L; MEI, R.P. **Aços e ligas especiais**.3 ed. Rio de Janeiro: Blucher, 2010. 646p.

TORRES, M.A.S.; VOORWALD, H.J.C.; **An evaluation of shot peening, residual stress and estress relaxation on the fatigue life of AISI 4340 steel**.International Journal of Fatigue 2002; pag.877-886; vol 24.

TUSEK, J.; SUBAN, M. **Experimental research of theeffect of hydrogen in argon as a shielding gas in arcwelding of high-alloystainlesssteel**. International Journal of HydrogenEnergy, Slovenia, v.25, n.25, p.369-376, 2000.

UTTRACHI, G.D.; MEYER, D.W.The basic of semiautomatic welding, **Welding Journal**, August, p.47-51, 1993.

SUBAN, M. & TUSEK, J. Dependence of melting rate in MIG/MAG welding on de type of shielding gas used. **Journal of Materials Processing Technology**.p.185-192, 2001.

WAINER, E.; BRANDI, S.D.; MELLO, F.D.H. **Soldagem - Processos e metalurgia.**

São Paulo: Edgard Blucher, 1992, 494p.

ZEEMANN, A. Diluição. **Infosolda**, 2003b. 4p. Disponível em:
<http://WWW.infosolda.com.br/download/50dda.pdf>.

Acesso em: 13/11/2014

APÊNDICE I

Variáveis de entrada e resultados dos valores geométricos dos cordões de solda(ZTA e ZF - Condição e réplica).

Condições/peças	1	2	3	4	5	6	7	8
	(1.1) (2.1)	(1.2) (2.2)	(1.3) (2.3)	(1.4) (2.4)	(1.5) (2.5)	(1.6) (2.6)	(1.7) (2.7)	(1.8) (2.8)
Corrente (A)	250	250	250	250	290	290	290	290
Temperatura de pré-aquecimento (°C)	--	--	350 (1 h)	350 (1 h)	--	--	350 (1 h)	350 (1h)
Temperatura de pós aquecimento (°C)	--	550 (3 h)	--	550 (3 h)	--	550 (3 h)	--	550 (3 h)
Largura do cordão (W) (mm)	15,21 17,18	16,50 15,24	18,75 18,37	19,57 19,28	23,42 22,77	17,03 19,35	19,97 20,28	21,47 21,12
Reforço do cordão (h) (mm)	2,48 2,77	2,57 2,41	2,63 2,43	2,63 2,55	3,51 3,89	2,76 2,45	2,88 2,59	2,41 3,21
Penetração máxima (Pmáx.) (mm)	2,39 2,48	2,55 2,06	2,86 2,78	2,58 2,36	2,72 2,64	2,55 2,94	3,23 3,58	3,02 3,14
Área depositada (Ad) (mm ²)	26,22 30,18	29,64 24,53	34,42 31,70	34,60 29,19	39,41 35,87	33,99 37,55	42,96 36,94	35,95 43,84
Área penetração axial (Ap) (mm ²)	20,30 21,85	19,70 17,45	23,42 22,02	23,51 21,46	27,79 28,98	29,59 26,90	35,51 36,76	38,27 34,02
Área total (At) (mm ²)	46,52 52,03	49,34 41,98	57,84 53,72	58,11 50,65	67,20 64,85	63,58 64,45	78,47 73,70	74,22 77,86
Área da ZTA (mm ²)	46,47 56,30	43,35 39,88	80,69 78,37	94,46 86,49	132,00 135,24	52,88 60,24	104,05 85,53	111,57 114,70

APÊNDICE II

Valores de microdurezaVickers (HV) distribuídas ao longo dos cordões: Corrente - 250 A

Posição (mm)	Cond-1	Rep-1	Cond-2	Rep-2	Cond-3	Rep-3	Cond-4	Rep-4
	(- - -)		(- - +)		(- + -)		(- + +)	
+2	344	352	310	313	273	279	189	187
+1,6	361	356	297	293	273	274	198	194
+1,2	351	344	310	335	269	273	216	255
+0,8	358	348	302	323	259	306	225	283
+0,4	409	347	296	315	267	287	241	267
0,0	331	352	303	333	297	293	249	267
-0,4	350	315	283	337	293	291	236	262
-0,8	328	313	287	336	285	288	228	258
-1,2	349	296	322	305	249	276	230	245
-1,6	289	308	350	329	260	300	231	249
-2,0	299	296	358	428	475	412	221	240
-2,4	581	550	387	402	493	491	331	333
-2,8	454	567	368	385	544	490	334	336
-3,2	570	558	386	362	505	480	315	330
-3,6	580	556	396	374	479	490	307	329
-4,0	581	597	269	357	495	500	333	327
-4,4	596	613	234	236	523	439	324	336
-4,8	278	544	224	237	445	443	324	315
-5,2	243	271	237	225	487	427	345	303
-5,6	261	285	197	217	445	396	319	327
-6,0	267	315	221	221	288	318	342	321
-6,4	309	326	232	210	257	300	300	262
-6,8	294	320	245	209	280	269	275	296
-7,2	327	305	226	215	332	324	277	281
-7,6	399	356	238	218	336	309	318	267
-8,0	351	381	220	220	335	297	321	287
-8,4	283	395	230	219	290	305	312	274
-8,8	284	392	212	215	292	328	302	283

APÊNDICE II - Continuação

Valores de microdurezaVickers (HV) distribuídas ao longo dos cordões: Corrente - 290 A

Posição (mm)	Cond-5	Rep-5	Cond-6	Rep-6	Cond-7	Rep-7	Cond-8	Rep-8
	(+ - -)		(+ - +)		(+ + -)		(+ + +)	
+2	230	243	292	297	249	258	251	255
+1,6	224	255	300	311	213	268	257	259
+1,2	225	239	295	298	228	268	254	277
+0,8	224	228	302	297	206	262	246	263
+0,4	244	262	297	303	222	265	250	268
0,0	296	289	306	315	211	259	258	286
-0,4	270	292	303	292	213	289	251	234
-0,8	256	244	294	299	211	263	263	259
-1,2	245	277	296	292	206	273	246	246
-1,6	238	243	291	289	211	285	252	253
-2,0	235	229	260	286	231	275	274	241
-2,4	224	235	284	271	224	247	269	231
-2,8	558	244	275	249	303	248	239	225
-3,2	552	589	287	375	441	562	293	291
-3,6	512	567	281	368	477	436	312	299
-4,0	437	523	345	363	559	448	337	286
-4,4	566	553	336	346	432	467	313	294
-4,8	413	512	394	316	439	618	286	291
-5,2	390	456	269	237	407	565	314	276
-5,6	449	412	211	221	414	596	404	423
-6,0	469	444	226	243	454	322	308	367
-6,4	504	499	231	233	491	284	307	286
-6,8	519	534	217	229	579	238	338	279
-7,2	438	448	225	237	274	255	330	268
-7,6	435	301	233	239	297	304	264	262
-8,0	289	291	239	229	281	292	264	255
-8,4	259	277	237	237	329	307	266	250
-8,8	262	256	219	224	312	336	248	253