



Rafael Luciano Dalcin

**ESTUDO DA SOLDAGEM MULTIPASSES ENTRE OS AÇOS
DISSIMILARES AISI 4140 E ASTM A36 SEM TRATAMENTO
TÉRMICO POSTERIOR**

Horizontina

2012

Rafael Luciano Dalcin

**ESTUDO DA SOLDAGEM MULTIPASSES ENTRE OS AÇOS
DISSIMILARES AISI 4140 E ASTM A36 SEM TRATAMENTO
TÉRMICO POSTERIOR**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Horizontina.

ORIENTADOR: Richard Thomas Lermen, Doutor em Engenharia.

CO-ORIENTADOR: Valtair de Jesus Alves, Mestre em Engenharia.

Horizontina

2012

**FAHOR - FACULDADE HORIZONTALINA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a monografia:

**“Estudo da soldagem multipasses entre os aços dissimilares AISI 4140 e
ASTM A36 sem tratamento térmico posterior”**

Elaborada por:

Rafael Luciano Dalcin

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Mecânica

**Aprovado em: 12/12/2012
Pela Comissão Examinadora**

**Prof. Dr. Richard Thomas Lermen
Presidente da Comissão Examinadora
Orientador**

**Prof. Me. Valtair de Jesus Alves
FAHOR – Faculdade Horizontalina
Co-orientador**

**Prof. Esp. Vilmar Bueno Silva
FAHOR – Faculdade Horizontalina**

**Prof. Me. Anderson Dal Molin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica - FAHOR**

**Horizontalina
2012**

AGRADECIMENTOS.

Aos meus pais, Gerônimo e Inês, pelo exemplo de vida, pelo incentivo e motivação demonstrados em todos os momentos, sempre sonhando com esta conquista.

Aos professores que me ajudaram no decorrer da graduação, em especial aos professores Richard Thomas Lermen e Valtair de Jesus Alves pelas orientações de qualidade, dedicação e pelo apoio prestado durante a elaboração do trabalho.

À Faculdade Horizontina pela disponibilidade do laboratório para realização dos testes práticos.

Aos colegas de graduação, pela convivência, amizades realizadas e pelas experiências trocadas no decorrer do curso.

A todos que colaboraram diretamente ou indiretamente com a realização deste trabalho, o meu sincero agradecimento.

“Tudo o que um sonho precisa para ser realizado é alguém que acredite que ele possa ser realizado.”

Roberto Shinyashiki

RESUMO

O principal objetivo do presente trabalho foi desenvolver e aplicar diferentes procedimentos de soldagem para unir o aço baixa liga AISI 4140 com o aço estrutural ASTM A36 pelo processo de soldagem MAG utilizando como consumível o arame AWS ER70S-6. Os estudos foram conduzidos utilizando a técnica de soldagem de múltiplas camadas, onde nove corpos de prova foram desenvolvidos através dos seguintes experimentos: inicialmente, três corpos de prova foram soldados com um, dois e três passes sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento; em sequência, outros três corpos de prova foram soldados com apenas pré-aquecimento no aço AISI 4140 (300 °C) e até três passes; por fim, utilizando pré-aquecimento no aço AISI 4140 (300 °C) e pós-aquecimento no conjunto soldado (724 °C), mais três corpos de prova foram soldados com um, dois e três passes. Através da análise das macrografias dos corpos de prova observou-se que os seis primeiros experimentos apresentaram uma zona afetada pelo calor (ZAC) significativa, porém com pequena variação de tamanho devido à quantidade de cordões de solda. Os experimentos realizados com pré-aquecimento e pós-aquecimento apresentaram ZAC muito pequenas. Através do uso das técnicas de soldagem multipasses, conseguiu-se uma redução nas zonas duras. Portanto, foi realizada a soldagem dos aços dissimilares (AISI 4140 e ASTM A36) com minimização dos efeitos térmicos através da utilização da técnica de multipasses, pré-aquecimentos e pós-aquecimentos.

Palavras-chave:

soldagem MAG - AISI 4140 - ASTM A36 - zona afetada pelo calor.

ABSTRACT

The main objective of this study was to develop and apply different welding procedures for joining AISI 4140 low alloy steel with ASTM A36 structural steel by MAG welding process using as consumable the AWS ER70S-6 wire. The studies were conducted using the multiple layers welding technique, where nine specimens were developed through the following experiments: initially, three specimens were welded with one, two and three passes without preheating and without post-heating; in sequence, three test specimens were welded just preheating the AISI 4140 steel (300 °C) using up to three passes; finally, preheating the AISI 4140 steel (300 °C) and post-heating the weldment (724 °C), three specimens were welded with one, two and three passes. Through the analysis of the macrographs samples was observed that the first six experiments showed a significant heat affected zone (HAZ) but with slight variation in size due to the amount of weld beads. Experiments performed with preheating and post-heating showed a very small HAZ. Through the use of the multiple layers welding technique a decrease of the hard zones was achieved. Therefore, it was performed the welding of dissimilar steels (AISI 4140 and ASTM A36) with minimization of thermal effects by using the multipass technique, pre-heating and post-heating.

Keywords:

MAG welding - AISI 4140 - ASTM A36 - heat-affected zone.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Microestrutura do aço ABNT 4140. Ataque: nital 2%. Aumento: 500X.....	13
Figura 2: Microestrutura do aço estrutural ASTM A36. Ataque: nital 2%.....	15
Figura 3: Processo de soldagem MAG.....	15
Figura 4: Diagramas TTT e TRC do aço AISI 4140.....	19
Figura 5: Zona de uma solda com passe único.....	21
Figura 6: Desenho esquemático de superposições da ZAC gerando as zonas frágeis localizadas.....	22
Figura 7: Desenho esquemático de um corpo de prova com aplicação da dupla camada. ...	25
Figura 8: Dispositivo para posicionamento dos aços.....	26
Figura 9: (A) MB AISI 4140, (B) MB ASTM A36, (C) Metal de solda, (D) ZAC AISI 4140, (E) ZAC ASTM A36. (1) 1° ponto de medição, (2) 2° ponto de medição, (3) 3° ponto de medição, (4) 4° ponto de medição, (5) 5° ponto de medição.....	28
Figura 10: Macrografia dos corpos de prova soldados sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento. (01) Um cordão de solda, (02) dois cordões de solda e (03) três cordões de solda.....	29
Figura 11: Perfil de dureza dos corpos de prova sem cuidados especiais.	30
Figura 12: Micrografias com um cordão de solda sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento. (A) Metal base AISI 4140, (B) Metal base ASTM A36.....	30
Figura 13: Micrografias com um cordão de solda sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento. (C) Metal base e ZAC 4140, (D) Metal base e ZAC ASTM A36.	31
Figura 14: Micrografias com um cordão de solda sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento. (E) ZAC AISI 4140 e metal de solda, (F) ZAC ASTM A36 e metal de solda...	31
Figura 15: Micrografias com dois cordões de solda sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento. (A) Zona afetada pelo 1° passe de solda. (B) Zona afetada pelo 2° passe de solda.....	32
Figura 16: Micrografias com dois cordões de solda sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento. (C) Zona afetada pelo 1° passe de solda. (D) Zona afetada pelo 2° passe de solda.....	32
Figura 17: Micrografias com dois cordões de solda sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento. (E) Zona afetada pelo 1° passe de solda. (F) Zona afetada pelo 2° passe de solda.....	33
Figura 18: Micrografias com dois cordões de solda sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento. (G) Zona afetada pelo 1° passe de solda. (H) Zona afetada pelo 2° passe de solda.....	33
Figura 19: Micrografias com três cordões de solda sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento. (A) Zona afetada pelo 1° passe de solda. (B) Zona afetada pelo 2° passe de solda.....	34
Figura 20: Micrografias com três cordões de solda sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento. (D) Zona afetada pelo 1° passe de solda. (C) Zona afetada pelo 3° passe de solda.....	34

Figura 21: Micrografias com três cordões de solda sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento. (E) Zona afetada pelo 2º passe de solda. (F) Zona afetada pelo 3º passe de solda.....	35
Figura 22: Micrografias com três cordões de solda sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento. (G) Zona afetada pelo 1º passe de solda. (H) Zona afetada pelo 2º passe de solda.....	35
Figura 23: Micrografias com três cordões de solda sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento. (J) Zona afetada pelo 1º passe de solda. (I) Zona afetada pelo 3º passe de solda.....	36
Figura 24: Micrografias com três cordões de solda sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento. (K) Zona afetada pelo 2º passe de solda. (L) Zona afetada pelo 3º passe de solda.....	36
Figura 25: Macrografia dos corpos de prova soldados com pré-aquecimento e sem pós-aquecimento. (01) Um cordão de solda, (02) dois cordões de solda e (03) três cordões de solda.....	37
Figura 26: Perfil de dureza dos corpos de prova com pré-aquecimento.....	37
Figura 27: Micrografias com pré-aquecimento no aço AISI 4140 e com uma camada de solda. (A) Metal base AISI 4140, (B) Metal base ASTM A36.....	38
Figura 28: Micrografias com pré-aquecimento no aço AISI 4140 e com uma camada de solda. (C) Metal base e ZAC 4140, (D) Metal base e ZAC ASTM A36.....	38
Figura 29: Micrografias com pré-aquecimento no aço AISI 4140 e com uma camada de solda. (E) Metal de solda e ZAC AISI 4140, (F) Metal de solda e ZAC ASTM A36.....	39
Figura 30: Micrografias com pré-aquecimento no aço AISI 4140 e com duas camadas de solda. (A) Zona afetada pelo 1º passe de solda. (B) Zona afetada pelo 2º passe de solda..	39
Figura 31: Micrografias com pré-aquecimento no aço AISI 4140 e com duas camadas de solda. (C) Zona afetada pelo 1º passe de solda. (D) Zona afetada pelo 2º passe de solda.	40
Figura 32: Micrografias com pré-aquecimento no aço AISI 4140 e com duas camadas de solda. (E) Zona afetada pelo 1º passe de solda. (F) Zona afetada pelo 2º passe de solda..	40
Figura 33: Micrografias com pré-aquecimento no aço AISI 4140 e com duas camadas de solda. (G) Zona afetada pelo 1º passe de solda. (H) Zona afetada pelo 2º passe de solda.	41
Figura 34: Micrografias com três camadas de solda e pré-aquecimento no aço AISI 4140. (A) Zona afetada pelo 1º passe de solda. (B) Zona afetada pelo 2º passe de solda.....	41
Figura 35: Micrografias com três camadas de solda e pré-aquecimento no aço AISI 4140. (D) Zona afetada pelo 1º passe de solda. (C), Zona afetada pelo 3º passe de solda.....	42
Figura 36: Micrografias com três camadas de solda e pré-aquecimento no aço AISI 4140. (E) Zona afetada pelo 2º passe de solda. (F) Zona afetada pelo 3º passe de solda.....	42
Figura 37: Micrografias com três camadas de solda e pré-aquecimento no aço AISI 4140. (G) Zona afetada pelo 1º passe de solda. (H) Zona afetada pelo 2º passe de solda.	43
Figura 38: Micrografias com três camadas de solda e pré-aquecimento no aço AISI 4140. (J) Zona afetada pelo 1º passe de solda. (I) Zona afetada pelo 3º passe de solda.	43
Figura 39: Micrografias com três camadas de solda e pré-aquecimento no aço AISI 4140. (K) Zona afetada pelo 2º passe de solda. (L) Zona afetada pelo 3º passe de solda.	44
Figura 40: Macrografia dos corpos de prova soldados com pré-aquecimento e pós-aquecimento. (01) Um cordão de solda, (02) dois cordões de solda e (03) três cordões de solda.....	44
Figura 41: Perfil de dureza dos corpos com pré-aquecimento e pós-aquecimento.	45
Figura 42: Micrografias com uma camada de solda, pré-aquecimento no aço AISI 4140 e pós-aquecimento no conjunto soldado. (A) Metal base AISI 4140, (B) Metal base ASTM A36.	45
Figura 43: Micrografias com uma camada de solda, pré-aquecimento no aço AISI 4140 e pós-aquecimento no conjunto soldado. (C) Metal base e ZAC 4140, (D) ZAC e metal base ASTM A36.....	46
Figura 44: Micrografias com uma camada de solda, pré-aquecimento no aço AISI 4140 e pós-aquecimento no conjunto soldado. (E) Metal de solda e ZAC AISI 4140, (F) Metal de solda e ZAC ASTM A36.....	46

Figura 45: Micrografias com duas camadas de solda, pré-aquecimento no aço AISI 4140 e pós-aquecimento no conjunto soldado. (A) Zona afetada pelo 1° passe de solda. (B) Zona afetada pelo 2° passe de solda.....	47
Figura 46: Micrografias com duas camadas de solda, pré-aquecimento no aço AISI 4140 e pós-aquecimento no conjunto soldado. (C) Zona afetada pelo 1° passe de solda. (D) Zona afetada pelo 2° passe de solda.....	47
Figura 47: Micrografias com duas camadas de solda, pré-aquecimento no aço AISI 4140 e pós-aquecimento no conjunto soldado. (E) Zona afetada pelo 1° passe de solda. (F) Zona afetada pelo 2° passe de solda.....	48
Figura 48: Micrografias com duas camadas de solda, pré-aquecimento no aço AISI 4140 e pós-aquecimento no conjunto soldado. (G) Zona afetada pelo 1° passe de solda. (H) Zona afetada pelo 2° passe de solda.....	48
Figura 49: Micrografias com três camadas de solda, pré-aquecimento no aço AISI 4140 e pós-aquecimento no conjunto soldado. (A) Zona afetada pelo 1° passe de solda. (B) Zona afetada pelo 2° passe de solda.....	49
Figura 50: Micrografias com três camadas de solda, pré-aquecimento no aço AISI 4140 e pós-aquecimento no conjunto soldado. (D) Zona afetada pelo 1° passe de solda. (C) Zona afetada pelo 3° passe de solda.....	49
Figura 51: Micrografias com três camadas de solda, pré-aquecimento no aço AISI 4140 e pós-aquecimento no conjunto soldado. (E) Zona afetada pelo 2° passe de solda. (F) Zona afetada pelo 3° passe de solda.....	50
Figura 52: Micrografias com três camadas de solda, pré-aquecimento no aço AISI 4140 e pós-aquecimento no conjunto soldado. (G) Zona afetada pelo 1° passe de solda. (H) Zona afetada pelo 2° passe de solda.....	50
Figura 53: Micrografias com três camadas de solda, pré-aquecimento no aço AISI 4140 e pós-aquecimento no conjunto soldado. (J) Zona afetada pelo 1° passe de solda. (I) Zona afetada pelo 3° passe de solda.....	51
Figura 54: Micrografias com três camadas de solda, pré-aquecimento no aço AISI 4140 e pós-aquecimento no conjunto soldado. (K) Zona afetada pelo 2° passe de solda. (L) Zona afetada pelo 3° passe de solda.....	51

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 REVISÃO DA LITERATURA	12
2.1 METALURGIA FÍSICA DO AÇO BAIXA LIGA AISI 4140	12
2.2 METALURGIA FÍSICA DO AÇO ESTRUTURAL ASTM A36	13
2.3 SOLDAGEM DO AÇO AISI 4140 COM O AÇO ASTM A36	15
2.3.1 PROCESSO DE SOLDAGEM MAG	15
2.3.2 SOLDABILIDADE DOS AÇOS ASTM A36 E AISI 4140	16
2.3.3 SOLDAGEM EM PASSE ÚNICO E MULTIPASSES	20
2.3.4 PRÉ-AQUECIMENTO NA SOLDAGEM.....	22
2.3.5 SOLDAGEM SEM TRATAMENTO TÉRMICO POSTERIOR (TTPS).....	24
2.3.6 TÉCNICA DA DUPLA CAMADA	25
3 METODOLOGIA	26
3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	26
3.2 MÉTODOS E TÉCNICAS.....	27
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	29
4.1 EXPERIMENTOS SEM PRÉ-AQUECIMENTO E SEM PÓS-AQUECIMENTO	29
4.2 EXPERIMENTOS COM PRÉ-AQUECIMENTO E SEM PÓS-AQUECIMENTO.....	36
4.3 EXPERIMENTOS COM PRÉ-AQUECIMENTO E PÓS-AQUECIMENTO	44
4.4 DISCUSÃO SOBRE OS RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS.....	51
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	53
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54

1 INTRODUÇÃO

As indústrias de projeto e construção de estruturas metálicas e equipamentos, considerando a crescente demanda de estruturas e/ou equipamentos de grande porte, por questões técnicas (suportar maior esforço mecânico) e, principalmente, econômicas (menor peso, menor área, menor consumo de energia), tem a necessidade de considerar o emprego dos aços baixa liga AISI 4140, pois o aço apresenta melhor resistência mecânica que os aços convencionais, e contribui para que as referidas estruturas possam suportar condições de serviços mais rigorosas (AGUIAR, 2001).

Os aços AISI 4140 são empregados na fabricação de elementos de máquinas de alta resistência, e por ser um aço de médio carbono, oferece ótima resistência ao impacto. Durante os processos de soldagem, em função dos elevados gradientes de temperatura, podem surgir zonas afetadas pelo calor, em função disso, suas características metalúrgicas são modificadas nas proximidades do cordão de solda, e apresentam algumas características que podem tornar a união frágil (ANDRADE, 2011).

Por ser um aço temperável, o aço AISI 4140 apresenta dificuldades na soldagem devido ao carbono equivalente existente na estrutura cristalina do material, no entanto, ele produz martensita quando austenitizado e resfriado rapidamente, sendo necessário realizar um pré-aquecimento antes de realizar a soldagem e um tratamento térmico posterior a soldagem para aliviar as tensões e melhorar a tenacidade desta zona, ou seja, para recuperar a zona afetada pelo calor. Tais tratamentos térmicos tornam-se inviáveis, devido a alguns fatores como: tamanho da peça, reparo no campo e o custo envolvido, também por questões técnicas e aos custos envolvidos na operação. As técnicas de utilizar várias camadas de solda têm sido pesquisadas no sentido de se evitar este tratamento térmico e garantir boas propriedades mecânicas da peça soldada (AZEVEDO, 2002).

O objetivo do experimento é realizar um estudo microestrutural da junta soldada composta pelos aços dissimilares (AISI 4140 e ASTM A36) unidos pelo processo de soldagem MAG sem tratamento térmico posterior. O desafio é minimizar os efeitos térmicos causados durante a soldagem através da utilização da técnica de multipasses, com e sem o uso do pré-aquecimento e pós-aquecimento. Após o término dos experimentos pretende-se avaliar os resultados dos experimentos através de análises metalográficas e ensaios mecânicos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura apresenta os conceitos fundamentais envolvidos na soldabilidade dos aços AISI 4140 e ASTM A36.

2.1 METALURGIA FÍSICA DO AÇO BAIXA LIGA AISI 4140

Os aços AISI 4140 são utilizados em aplicações que requerem uma combinação de temperabilidade moderada e boa resistência e tenacidade. Devido ao aço AISI 4140 apresentar um elevado teor de carbono, tem maior temperabilidade e resistência, portanto apresenta limitações na parte de conformabilidade e soldabilidade (METALS HANDBOOK, 1990). Apesar dos aços de baixa liga AISI 4140 não apresentarem boa soldabilidade, eles são bastante requisitados, com o objetivo de redução de peso ou para suportar maiores esforços mecânicos (AGUIAR, 2001).

Estes aços são ligados ao Cromo (~1%) e ao Molibdênio (~0,2%). São comumente usados na condição temperada e revenida e atingem alta resistência mecânica à temperatura ambiente variando de 590 a 940 MPa. São amplamente utilizados na indústria em componentes pressurizados, os quais requerem tensão limite de escoamento entre 410 MPa e 965 MPa (LIMA, 2006).

O cromo é um elemento que forma carbonetos duros nos aços, quando apresenta altos teores aumenta a resistência ao desgaste. Em teores baixos aumenta a resistência, o limite elástico, a tenacidade e resistência ao choque do aço. O molibdênio é um formador de carbonetos mais forte que o cromo. Além de aumentar a resistência mecânica, sua ação quando adicionado, é no sentido de reduzir a suscetibilidade a fragilidade de revenido, além de melhorar as propriedades a temperaturas mais elevadas (CHIAVERINI, 1979).

Smith (1993), descreve que os elementos de liga são adicionados nos aços-carbono por vários motivos, sendo que o objetivo principal é melhorar as propriedades mecânicas pelo aumento da profundidade de têmpera de um aço, permitir maiores temperaturas de revenimento enquanto se mantém alta resistência e boa ductilidade, melhorar as propriedades mecânicas a altas e baixas temperaturas, melhorar a resistência à corrosão e oxidação a elevadas temperaturas e melhorar propriedades especiais tais como resistência à abrasão e comportamento em fadiga. Na Tabela 1 está descrito a composição química do aço ABNT 4140.

Tabela 1
Composição química do aço ABNT 4140 (NBR NM 87/2000)

Composição química - Faixa e limites (%)						
C	Si	Mn	P (máx)	S (máx)	Cr	Mo
0,38-0,43	0,15-0,30	0,75-1,00	0,035	0,035	0,80-1,10	0,15-0,25

Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2000.

A Figura 1 mostra uma microestrutura do aço baixa liga 4140, na qual, compõem nas regiões escuras perlita e nas claras ferrita.

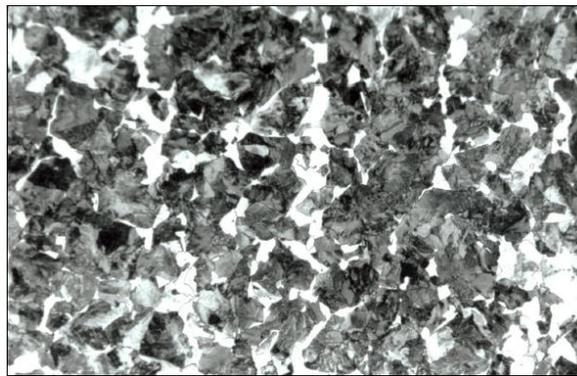


Figura 1: Microestrutura do aço ABNT 4140. Ataque: nital 2%. Aumento: 500X. Fonte: Aguiar, 2001.

Segundo Bueno (1999), o aço AISI 4140 pode ser empregado em temperaturas de até 480 °C, sem alterar as propriedades, acima desta, sua resistência decai rapidamente com a elevação da temperatura. Como outros aços martensíticos e ferríticos, o aço baixa liga 4140 sofre a transição do comportamento dúctil-frágil em baixas temperaturas, sendo que a temperatura de transição varia com o tratamento térmico e o estado de concentração de tensões.

2.2 METALURGIA FÍSICA DO AÇO ESTRUTURAL ASTM A36

Os aços estruturais são bastante conhecidos como materiais de construção, os quais combinam resistência mecânica, trabalhabilidade, disponibilidade e baixo custo. De maneira geral, é fácil compreender a importância e a extensão da aplicação dos aços em todos os campos da engenharia, nas estruturas, quer as fixas, como de edifícios, pontes, etc., quer as móveis, na indústria ferroviária, automobilística, naval, aeronáutica, etc. Também existem outras aplicações que exigem uma relação de resistência e peso mais satisfatória, por exemplo, as indústrias de transporte, onde os equipamentos utilizados (caminhões, ônibus, aviões, equipamentos ferroviários, equipamentos rodoviários, navios, etc.) pelas condições

próprias de serviço, necessitam-se reduzir o peso e aumentar a resistência, devido aos equipamentos estarem sujeito a esforços severos e choques repentinos (CHIAVERINI, 1979).

Na maioria das aplicações estruturais, o teor de carbono desses aços varia de 0,15% a 0,40%, com outros elementos (Mn, Si e S) nos teores considerados normais. O aço com carbono e manganês em torno de 2% e 0,50% respectivamente, apresenta limite de escoamento de cerca de 24,5 Kgf/mm² (245 MPa) e limite de resistência de 42,0 Kgf/mm² (410 MPa) (CHIAVERINI, 1979). Contudo, são aços facilmente soldáveis por qualquer processo a arco, gás ou resistência (MODENESI, 2008). A Tabela 2 apresenta a composição química para o aço ASTM A36.

Tabela 2

Composição química do aço estrutural ASTM A36

Composição química do aço estrutural ASTM A36					
C (máx)	Mn (máx)	Si	Cu	P (máx)	S (máx)
0,26%	1,35% (A)	0,40%	0,20%	0,04%	0,05%

Fonte: Belgo, 2012.

(A) Nota: Para cada redução de 0,01% do C máximo especificado, um acréscimo de 0,06% de Mn é especificado até o valor máximo de 1,35%.

O carbono é o principal responsável pelo aumento da resistência mecânica e pela queda da ductibilidade, trabalhabilidade, resistência ao choque e soldabilidade. Sendo assim, pequenas quantidades de outros elementos de liga são utilizados para melhoria das propriedades do aço, obtendo o máximo em propriedades de uma liga contendo um baixo teor de carbono. Portanto, devido aos seus efeitos prejudiciais a soldagem é mantido em percentual baixo. O manganês tem a função de agente dessulfurante e desoxidante pelo fato de reagir com oxigênio evitando o desprendimento de bolhas. O manganês que não reagiu com o oxigênio ou com o enxofre pode atuar de duas maneiras: quando o teor de carbono for baixo, ele se dissolve na ferrita, aumentando sua dureza e resistência, mas com teor de carbono mais elevado, aumenta ainda mais a dureza e a resistência do aço (CHIAVERINI, 1979).

A microestrutura do aço ASTM A36 é composta por ferrita (partes claras) e perlita (partes escuras). A Figura 2 mostra uma imagem da microestrutura do aço estrutural ASTM A36.

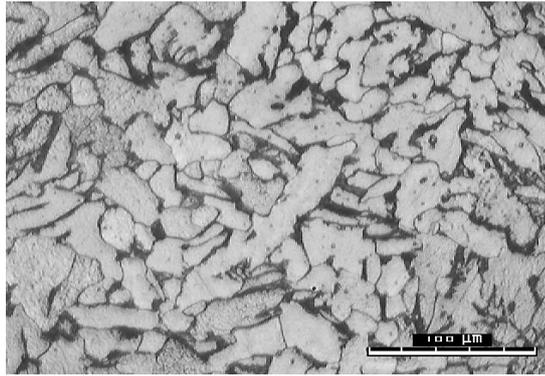


Figura 2: Microestrutura do aço estrutural ASTM A36. Ataque: nital 2%. Fonte: Silva JR; Carlech; Neto, 2012.

Para aços estruturais com baixos teores de carbono, como o ASTM A36, a poça de fusão solidifica-se inicialmente como ferrita delta, podendo formar austenita. Durante o resfriamento, a ferrita delta remanescente transforma-se em austenita e esta, em função das elevadas temperaturas, sofre um grande crescimento de grão, tendendo a apresentar uma estrutura de grãos colunares e grosseiros, similar à estrutura de fusão da zona fundida (ZF). Em temperaturas mais baixas, inferiores a 900 °C, a austenita se decompõe, resultando em diferentes produtos ou constituintes (MODENESI, 2004).

2.3 SOLDAGEM DO AÇO AISI 4140 COM O AÇO ASTM A36

Esta seção apresenta uma fundamentação teórica para contribuir com os processos de soldagem dos aços dissimilares (ASTM A36 e AISI 4140).

2.3.1 Processo de soldagem MAG

A Figura 3 ilustra esquematicamente o processo de soldagem MAG.

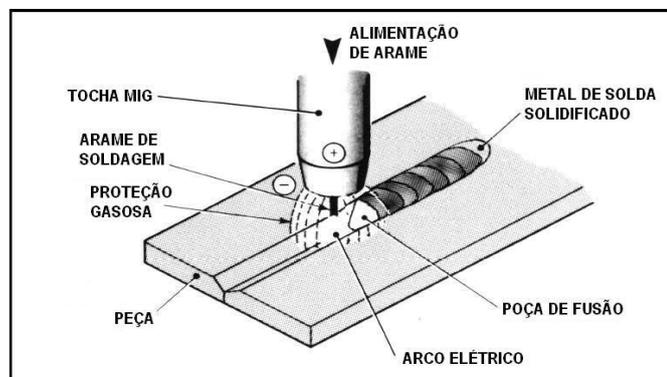


Figura 3: Processo de soldagem MAG. Fonte: ESAB, 2004.

A soldagem é realizada por um arco elétrico, estabelecido entre um arame nu continuamente alimentado e a peça. Esse processo utiliza como proteção para a poça de soldagem contra contaminação do ar externo uma fonte externa de gás de proteção. Geralmente os gases utilizados são inertes (MIG), como argônio e hélio, ou ativo (MAG), tais como CO₂, ou argônio+ CO₂, ou argônio+ O₂, ou combinação desses três gases. O processo tem muitos benefícios devido a ser adequado para robotização, sendo que podem ser soldadas ligas ferrosas e não ferrosas (MACHADO, 1996).

2.3.2 Soldabilidade dos aços ASTM A36 e AISI 4140

Os aços estruturais ASTM A36 são aços de baixo carbono, como consequência, tem boa soldabilidade e não apresentam grandes variações de dureza após a soldagem. Os aços AISI 4140 são aços de baixa liga e apresentam teores de carbono mais elevado do que os aços estruturais, portanto, tem maior temperabilidade que os aços de baixo carbono, tornando sua soldabilidade bem menor (WAINER; BRANDI; MELLO, 2004).

Durante o processo de soldagem destes aços existem vários fatores metalúrgicos que podem afetar a soldabilidade, entre eles: temperabilidade, microestruturas do metal de solda, microestruturas da zona afetada pelo calor.

A temperabilidade é usada como um indicador de soldabilidade, e atua como guia para a seleção de materiais e processos de forma a evitar um excessivo endurecimento, o qual pode causar trincas na ZAC. Aços com alta temperabilidade proporcionam uma elevada fração volumétrica de martensita na ZF e na ZAC e essa microestrutura é altamente susceptível a trincas induzidas por hidrogênio (AGUIAR, 2001).

A microestrutura do metal de solda é principalmente controlada pela composição química e a taxa de resfriamento. Um dos principais parâmetros que afetam a microestrutura do metal de solda é a adição de elementos de liga que influenciam a microestrutura pelo aumento da temperabilidade, por exemplo, inibindo a transformação da ferrita de contorno de grão pelo controle da quantidade de oxigênio no metal de solda que afetará a composição e distribuição de inclusões não metálicas (ARAÚJO, 2006).

Durante a soldagem dos aços carbono, a zona afetada pelo calor (ZAC) sofre aquecimento acima da temperatura crítica de austenitização, alterando as

propriedades mecânicas e estruturais já existentes. Portanto, esta região deverá ser resfriada de modo que se evite a formação de microconstituíntes frágeis, minimizando-se, assim, as alterações das propriedades mecânicas originais. A transformação de fase ocorrida durante o resfriamento conduzirá a uma estrutura ferrítica com regiões de martensita, ou ainda bainita grosseira, dependendo da taxa de resfriamento e do tipo de aço (MODENESI, 2004).

As trincas são consideradas uns dos tipos mais sérios de descontinuidades em soldas, estas se desenvolvem quando tensões de tração atuam em um material fragilizado. Quando o hidrogênio estiver presente em um grau suficiente ele é absorvido na poça de fusão e em parte transferido para a ZAC, por difusão. As tensões que agem sobre a solda aparecem inevitavelmente devido a tensões de contração durante o resfriamento e podem ser suplementadas por outros esforços resultantes da rigidez das partes a serem soldadas (BUENO, 1999).

A microestrutura suscetível na ZAC representa aquelas partes da ZAC que sofreram ciclos de temperatura suficientemente alta e que no resfriamento produzem microestruturas que são usualmente mais duras e suscetíveis a fragilização pelo hidrogênio. O aço AISI 4140 é um aço martensítico e, portanto é suscetível ao hidrogênio. Os maiores riscos de trinca ocorrem quando temperaturas próximas da temperatura ambiente são atingidas. Em vista disso, nos aços AISI 4140, as trincas ocorrem abaixo de 150 °C e podem aparecer várias horas após a soldagem ter sido completada (BUENO, 1999).

Antes de realizar a união das juntas soldadas é necessário determinar a energia de soldagem, na qual pode ser definida como a quantidade de energia imposta por determinada unidade de comprimento do cordão de solda pelo deslocamento de uma fonte de calor (AWS D1.1, 2004). A Equação 1 apresenta a fórmula para calcular a energia de soldagem.

$$E = \eta \times \frac{U \times I}{V} \quad (1)$$

Onde:

E : Energia de soldagem (J/mm)

η : Rendimento do arco

U : Tensão de soldagem (V)

I: Corrente de soldagem (A)

V: Velocidade de soldagem (mm/s)

A soldagem do aço ASTM A36 vai depender dos seus teores de C e Mn e dos níveis de impurezas. Os aços carbono com percentual de carbono de até 0,15% possuem excelente soldabilidade por não serem temperados (MOREIRA, 2008). Já os aços com percentual de carbono entre 0,15% e 0,30% possuem boa solubilidade e podem ser totalmente soldados em espessuras até 12,7 mm. A soldagem de seções mais espessas poderá necessitar de cuidados especiais e algumas precauções devem ser tomadas, devido ao fato de existir a possibilidade de endurecimento (BARBOSA, 2007).

Os aços estruturais ASTM A36 dependendo da composição química, dos procedimentos/parâmetros de soldagem empregados e da taxa de resfriamento pode se tornar susceptível a um ou mais problemas de soldabilidade, dentre eles: trincas induzidas pelo hidrogênio (trincas a frio), trincas de solidificação (trincas a quente), decoesão lamelar, presença de inclusões, porosidades e variações de propriedades mecânicas tanto no metal de solda quanto na ZAC (MOREIRA, 2008).

Os aços AISI 4140 produzem uma elevada fração volumétrica de martensita, com relativa facilidade quando austenitizados e resfriados rapidamente. Este constituinte, dependendo do seu teor de carbono, apresenta elevada dureza, baixa tenacidade e resistência ao impacto, sendo susceptível a trincas (AGUIAR; FARIAS; SILVA, 2002).

Segundo Aguiar (2001), para realizar a soldagem dos aços AISI 4140 deve ser realizada uma escolha criteriosa, seguindo as seguintes recomendações: selecionar processo e consumíveis de baixo hidrogênio, usar pré-aquecimento, usar temperatura de interpasse e, muitas vezes, pós-aquecimento, em função da temperabilidade destes aços. Esta última recomendação, muitas vezes, torna-se inviável devido à impossibilidade de levar a peça ao forno, também pelo custo elevado ou ainda pela possibilidade de danificar determinados componentes na vizinhança da solda. Conforme Modenesi (2008), para um teor de carbono inferior a 0,2% e espessura menor que 9,5 mm, a soldagem pode ser feita com um pré-aquecimento mínimo de 40 °C. Maiores teores de carbono e maiores espessuras exigem pré-aquecimento com temperaturas de até 370 °C.

O teor de carbono pode modificar sensivelmente a posição das linhas de início e fim de transformação das curvas do diagrama de tempo, temperatura e transformação (TTT). Além do carbono, os elementos de liga que podem ser adicionados nos aços afetam consideravelmente a posição das curvas isotérmicas. Outros fatores que podem modificar a posição das curvas TTT são o tamanho de grão da austenita e a homogeneidade da austenita (CHIAVERINI, 1979).

A microestrutura formada em função da velocidade de resfriamento (ou da temperatura de transformação) em um dado aço pode ser obtida a partir de diagramas de transformação. Todavia, estes diagramas são obtidos experimentalmente para transformações de temperaturas constantes (Diagramas TTT) ou para transformações durante um resfriamento contínuo (Diagramas TRC) e mostram a evolução da microestrutura em função da temperatura e do tempo de resfriamento (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011). A Figura 4 mostra diversas curvas de resfriamento traçadas sobre o diagrama TRC do aço AISI 4140.

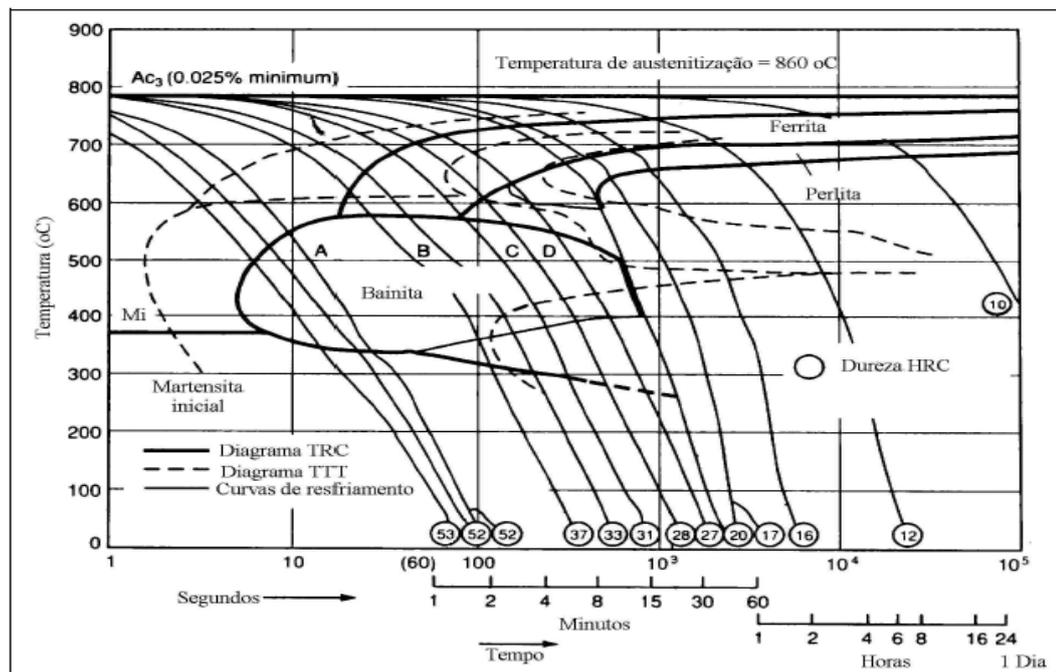


Figura 4: Diagramas TTT e TRC do aço AISI 4140. Fonte: Metals Handbook, 1990; Aguiar, 2001.

Quanto mais para a direita estiver à posição do diagrama TRC, mais fácil será a formação de martensita, sendo assim, pior a soldabilidade do aço. O resfriamento rápido tem o mesmo efeito dos elementos que aumentam a temperabilidade. Aguiar afirma que quanto maior for o tamanho do grão austenítico menor a quantidade de contorno por unidade de volume, deste modo, maior o tempo de incubação da

austenita e maior a temperabilidade do aço, portanto, este fato justifica a facilidade da ZAC-GG de formar martensita (AGUIAR, 2001).

Outro fator a ser destacado na Figura 4 é que quanto maior o volume do material, maior é a taxa de resfriamento. Pelo fato da velocidade de resfriamento variar de ponto a ponto na ZAC e que cada curva de resfriamento cruza o diagrama em locais específicos, a ZAC apresenta microestruturas diferentes a cada ponto. Próxima a linha de fusão, as microestruturas do aço AISI 4140 é formada por martensita e bainita para um carbono equivalente adequado (AGUIAR, 2001).

2.3.3 Soldagem em passe único e multipasses

Durante a realização de uma solda com passe único, a poça de fusão e as regiões adjacentes do metal base são submetidas a ciclos térmicos cujas temperaturas de pico decrescem à medida que se afastam do eixo central da solda o que causa alterações microestruturais em relação ao material original. Os problemas gerados por estas alterações microestruturais só podem ser solucionados através de tratamentos térmicos após a soldagem. Na soldagem com vários passes as referidas regiões da solda são submetidas a ciclos térmicos múltiplos devido aos vários passes provocando novas alterações nas microestruturas destas regiões com um grau de complexidade maior. Neste tipo de solda, o calor gerado pelo ciclo de um passe pode ser aproveitado para fazer um tratamento térmico no passe anterior, evitando muitas vezes o tratamento após a soldagem (AGUIAR, 2001).

Na solda realizada apenas por um só passe, a microestrutura da ZF é formada pelos produtos da decomposição da austenita em ferrita durante o ciclo de resfriamento contínuo, sendo que a ferrita assume diferentes morfologias, algumas de grande semelhança. Já em soldas multipasses, a microestrutura será ainda mais complexa, sendo formada por regiões reaquecidas e alteradas pelos ciclos térmicos dos passes seguintes e por regiões que permaneceram basicamente inalteradas. Portanto, as características desta microestrutura, tanto em escala microscópica como em escala sub-microscópica, são fundamentais na determinação das propriedades finais da ZF (MODENESI, 2004).

A soldagem com passe único é dividida basicamente em três regiões: zona fundida (ZF) constituída pelo metal fundido, zona de ligação (ZL), constituída por uma estreita região onde ocorre uma fusão parcial do metal base junto à zona fundida e zona afetada pelo calor (ZAC), região do metal base que sofreu alterações

microestruturais causadas pelo calor da soldagem (METALS HANDBOOK, 1990). A Figura 5 apresenta as regiões da solda.

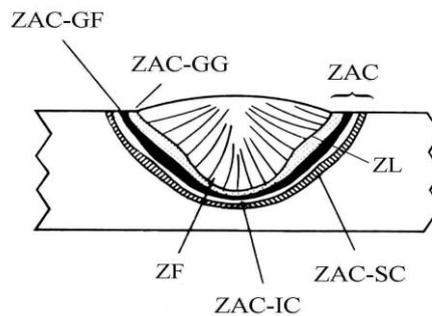


Figura 5: Zona de uma solda com passe único. Fonte: Metals Hanbook, 1990.

Devido à taxa de resfriamento e de solidificação da soldagem, os elementos de liga e as impurezas podem segregar para as regiões interdendríticas ou intercelulares e para o centro da solda, resultando numa composição química localmente heterogênea. Com isso, o comportamento da transformação do metal de solda pode ser bastante diferente do metal base. Dentro da zona fundida o pico de temperatura excede o ponto de fusão do metal base e a composição química do metal de solda vai depender da escolha dos consumíveis, da taxa de diluição do metal base e das condições de soldagem (AGUIAR, 2001).

A composição química da ZAC permanece inalterada por uma larga faixa onde o pico de temperatura não atingiu o ponto de fusão do metal base. Entretanto, ocorre uma mudança considerável na microestrutura durante a soldagem devido ao rigoroso ciclo térmico. O metal imediatamente vizinho a zona fundida é aquecido dentro do campo austenítico onde, os precipitados que se formaram em processos anteriores, são geralmente dissolvidos. Portanto, o papel de evitar o crescimento do grão da austenita em temperaturas elevadas (efeito cinturão), exercidos pelos precipitados, deixa de existir e a austenita experimenta um substancial crescimento de grão, produzindo a região grosseira da ZAC. O tamanho médio do grão austenítico, que é função do pico de temperatura atingido, decresce com o aumento da distância da zona fundida (AGUIAR, 2001).

A Figura 6 apresenta um desenho esquemático da soldagem multipasses, na qual mostra a presença de zonas reaquecidas dentro da zona fundida (METALS HANDBOOK, 1990).

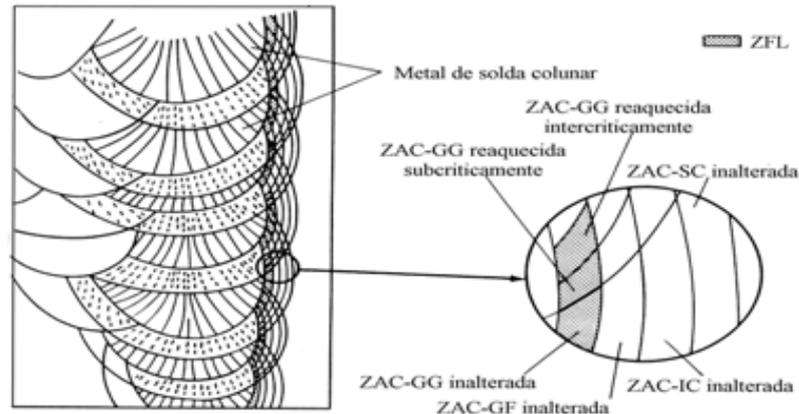


Figura 6: Desenho esquemático de superposições da ZAC gerando as zonas frágeis localizadas. Fonte: Metals Handbook, 1990.

Conforme Metals Handbook (1990), com a soldagem multipasses, o refino parcial da microestrutura pelo passe subsequente aumenta a heterogeneidade na microestrutura e nas propriedades mecânicas da peça soldada. Como consequência, a reaustenitização e o aquecimento subcrítico podem ter um profundo efeito nas subseqüentes estruturas e propriedades da ZAC. A diminuição da tenacidade está relacionada com pequenas regiões dentro da zona afetada pelo calor com grãos grosseiros (ZAC-GG) que possuem ductilidade limitada e baixa resistência à clivagem, conhecidas como zonas frágeis localizadas (ZFL). Estas zonas são constituídas por várias outras zonas como a ZAC-GG inalterada, zona da ZAC-GG reauecida intercriticamente (ZAC-GGRI) e zona da ZAC-GG reauecida subcriticamente (ZAC-GGRS). Nas adjacências da zona de ligação, as ZFL podem estar alinhadas (Figura 6) e este alinhamento proporciona um caminho fácil para a propagação de trincas.

2.3.4 Pré-aquecimento na soldagem

O pré-aquecimento consiste em aquecer o metal base acima da temperatura ambiente antes da soldagem e tem como objetivo principal a prevenção de nucleação de trincas na zona de fusão e na zona afetada pelo calor. Os principais efeitos do pré-aquecimento são: menor tendência à formação da martensita devido à diminuição do tempo de resfriamento, redução da dureza obtida na zona afetada pelo calor, diminuição das tensões e distorções residuais e permitir que o hidrogênio tenha possibilidade de se difundir, reduzindo a tendência à fissuração a frio. A temperatura de pré-aquecimento não deve ser excessiva, devendo ser apenas a necessária para evitar a obtenção da estrutura martensítica. O pré-aquecimento pode ser realizado em um forno com controle de temperatura ou através de

maçarico. As temperaturas de pré-aquecimento são recomendadas em função do teor de carbono ou do carbono equivalente e da espessura da liga a ser soldada (BARBOSA, 2007).

Com o carbono equivalente é possível relacionar a composição química dos aços com a tendência dos mesmos apresentarem estruturas frágeis. Outro aspecto que deve-se levar em consideração para a soldagem de aços com características mecânicas elevadas é o carbono equivalente, pois o carbono é o elemento que possui influência na temperabilidade e na dureza final da junta soldada. Para evitar que o carbono gere estruturas frágeis é recomendado o pré-aquecimento do metal de base, sendo que quanto maior for o teor de carbono equivalente do metal base, maior deve ser a temperatura de pré-aquecimento (ESAB, 2004).

A AWS D1.1 (2004), recomenda para o cálculo de carbono equivalente a Equação 2:

$$CE = C + \frac{(Mn+Si)}{6} + \frac{(Cr+Mo+V)}{5} + \frac{(Ni+Cu)}{15} \quad (2)$$

Onde:

CE: Carbono equivalente

C: Carbono

Mn: Manganês

Si: Silício

Cr: Cromo

Mo: Molibdênio

V: Vanádio

Ni: Níquel

Cu: Cromo

Em função do resultado de carbono equivalente do material é possível verificar a necessidade de realizar o pré-aquecimento antes de executar a soldagem. A temperatura de pré-aquecimento varia de acordo com o percentual de carbono equivalente identificado no material, sendo que as temperaturas recomendadas são ilustradas na Tabela 3 (ESAB, 2004).

Tabela 3

Temperatura de pré-aquecimento recomendado por percentual de carbono equivalente

Carbono equivalente (%)	Temperatura de pré-aquecimento recomendada
< 0,30	Opcional
0,31 - 0,45	100 °C - 200 °C
0,45 - 0,60	200 °C - 250 °C
> 0,60	250 °C - 300 °C
Aços ferramenta, aços mola, aços de composição desconhecida.	~ 300 °C

Fonte: ESAB, 2004.

Modenesi (2008), comenta que é importante seguir as recomendações das normas de soldagem para que as soldas realizadas atinjam os requisitos de qualidade desejados.

2.3.5 Soldagem sem tratamento térmico posterior (TTPS)

Os aços temperáveis, durante o processo de soldagem, apresentam estruturas martensíticas não revenidas de elevada dureza e baixa tenacidade que, associadas às tensões residuais, podem gerar trincas. Como prevenção, realiza-se um tratamento térmico pós-soldagem para aliviar as tensões internas e melhorar as propriedades mecânicas (AZEVEDO, 2002). As principais funções do tratamento térmico pós-soldagem, segundo Barbosa (2007), é revenir ou recozer a zona fundida e a ZAC para diminuir a dureza ou melhorar a tenacidade, diminuir as tensões residuais associadas com a soldagem e permitir a difusão do hidrogênio.

O revenimento é o tratamento térmico que consiste em aquecer o material a temperaturas bastante inferiores à temperatura crítica, permitindo uma certa acomodação do sistema cristalino e, como consequência, reduz a dureza e aumenta a tenacidade da peça após o processo de soldagem. A estrutura resultante chama-se de martensita revenida (BARBOSA, 2007).

A soldagem destes aços sem tratamento térmico posterior constitui um recurso atrativo, pois elimina os tratamentos térmicos, que, em geral, são caros e demorados devido ao tempo de permanência no forno podendo, ainda, apresentar dificuldades quando realizadas em grandes estruturas ou necessita-se fazer a montagem e reparo no campo (AZEVEDO, 2002).

2.3.6 Técnica da dupla camada

A técnica da dupla camada foi desenvolvida nos anos 60 para evitar trincas de reaquecimento. Com o passar dos anos percebeu-se que esta técnica poderia ser utilizada para evitar o TTPS. Desde então, vários esforços estão sendo desenvolvidos no sentido de qualificar procedimentos de soldagem que garantam boas propriedades mecânicas, para os aços baixa liga tais como os AISI 4130, 4140 e 4340 (AGUIAR, 2001).

A técnica da dupla camada utiliza um método controlado de deposição, de modo que a segunda camada promova o refino e a redução da dureza da ZAC gerada pela primeira camada. O efeito desta técnica vai depender principalmente dos parâmetros de soldagem utilizados na deposição das camadas (BUENO, 1999). A Figura 7 apresenta detalhadamente a técnica utilizada.

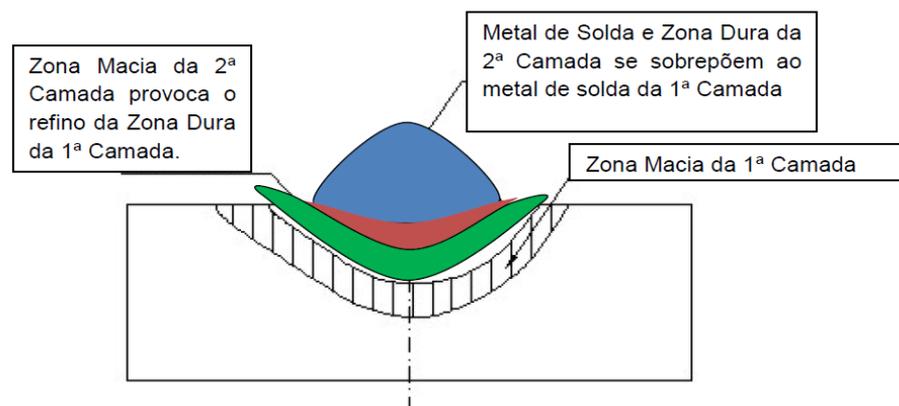


Figura 7: Desenho esquemático de um corpo de prova com aplicação da dupla camada.
Fonte: Andrade, 2011.

Segundo Bueno (1999), a primeira camada produz, inicialmente, um certo grau de refino, sendo dependente da sequência de deposição. A segunda camada penetra na primeira camada promovendo um refino da região de grãos grosseiros da ZAC da mesma. Os principais parâmetros, os quais devem ser observados para uma aplicação eficaz desta técnica, são: dimensões do cordão da primeira camada; deposição adequada das camadas; relação de aporte térmico entre as camadas; e a cavidade de reparo deve estar suficientemente aberta para permitir adequado ângulo de ataque do eletrodo.

3 METODOLOGIA

Nesta seção são descritos os materiais e equipamentos bem como os métodos e técnicas utilizadas para realização deste trabalho.

3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Os materiais selecionados como corpos de prova foram construídos a partir de barras redondas do aço baixa liga AISI 4140 com \varnothing 22,225 x 150 mm unidas pelo processo de soldagem MAG com chapas retangulares do aço estrutural ASTM A36 com dimensões 12,7 x 50 x 150 mm. Devido à necessidade de depositar os cordões de solda nos corpos de prova e garantir que os mesmos fossem soldados com metal de adição igual, utilizou-se o arame maciço AWS ER70S-6, com diâmetro de 1,00 mm, cuja composição química do metal depositado, encontra-se na Tabela 4.

Tabela 4

Composição química e propriedades mecânicas do arame AWS ER70S-6

Composição química e propriedades mecânicas do consumível											
Materiais	Elemento Químico (%)										
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	
AWS ER70S-6	0,06-0,15	1,4-1,85	0,8-1,15	0,025	0,035	0,15	0,15	0,15	0,03	0,5	
Resistência à Tração (mínimo)			Limite Escoamento (mínimo)			Alongamento (mínimo)					
AWS ER70S-6	480 Mpa			400 Mpa			22%				

Fonte: AWS A5.18, 2001.

A Figura 8 mostra um desenho esquemático do dispositivo posicionador e fixador utilizado na soldagem das peças do aço ASTM A36 com o aço AISI 4140.

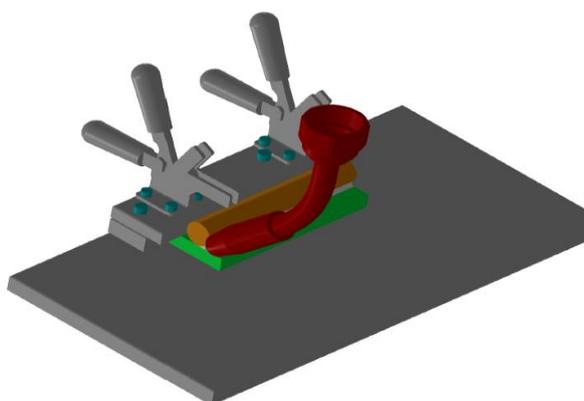


Figura 8: Dispositivo para posicionamento dos aços.

As soldagens foram realizadas através de uma (máquina manual) fonte de potência SMASHWELD 250 – ESAB, onde diferentes parâmetros foram ajustados. Um forno (mufla) da marca LAVOISIER foi utilizado para a realização de pré-aquecimento e pós-aquecimento.

3.2 MÉTODOS E TÉCNICAS

Os experimentos foram realizados utilizando a técnica de soldagem com passe único, dois passes e três passes. Os cordões de solda foram realizados em forma de junta em ângulo, onde o arame foi posicionado num ângulo de 45° entre as duas chapas, 90° em relação ao eixo da solda. A distância do bico de contato à peça foi de 20 mm. As soldas foram aplicadas em apenas um lado da junta. A alimentação do arame foi acionada manualmente, onde a velocidade média manteve-se em 11,7 m/min e os parâmetros de soldagem são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5
Parâmetros utilizados na soldagem dos corpos de prova

Corpo de Prova		Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade de Soldagem (mm/s)	Vazão de Gás (litros/min)	Cateto da Solda (mm)	Energia da soldagem (J/mm)
Amostras 1, 4 e 7	1 ^a Camada	200	21	2,5	14	12	1680
	1 ^a Camada	200	21	5,32	14	12	789,47
Amostras 2, 5 e 8	2 ^a Camada	200	21	7,14	14	12	588,23
	1 ^a Camada	200	21	10	14	12	420
Amostras 3, 6 e 9	2 ^a Camada	200	21	8,06	14	12	521,09
	3 ^a Camada	200	21	10	14	12	420

Um total de nove corpos de prova (amostras) foram desenvolvidos. As amostras 1, 2 e 3 foram realizadas sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento. As amostras 4, 5 e 6 foram feitas apenas com pré-aquecimento no aço AISI 4140 durante 50 minutos à 300 °C. Por fim, as amostras 7, 8 e 9 foram realizadas utilizando pré-aquecimento no aço AISI 4140 durante 50 minutos à 300 °C, pós-aquecimento no conjunto soldado por 60 minutos à 724 °C e resfriamento lento (dentro do forno).

Os corpos de prova foram cortados com uma máquina de corte metalográfica AROTEC COR-40 com refrigeração. A parte inicial e final das amostras (25 mm) foram descartadas, pelo fato de eliminar a chance de se estudar uma área onde o soldador estava estabilizando o arco ou a dispersão de calor não uniforme. Os 100 mm restantes da amostra foram divididos em três partes, e em seguida, as peças foram lixadas gradualmente com uma Politriz - AROTEC APL-4 até apresentarem características visuais satisfatórias para ataque químico. O ataque químico, realizado com nital 3%, funciona como um revelador de microestrutura, e possibilita análise macro e micro estrutural da peça. Para garantir a precisão dos resultados das análises, foi desfrutado dos equipamentos disponíveis na FAHOR para realizar os testes almejados.

As macrografias da secção transversal do cordão foram realizadas com uma máquina fotográfica digital. As microestruturas foram obtidas, através de um microscópio óptico série-SM Union Optical. Os ensaios de dureza foram realizados com o durômetro PANANTEC ATMI. As medições foram realizadas com carga de 150 kg a cada 2 mm de distância criando assim um perfil de dureza rockwell. Para fazer as medições de dureza dos corpos de prova foram selecionados às regiões mais duras, ou seja, apenas os pontos críticos. A Figura 9(01) apresenta os procedimentos utilizados nas amostras 1, 2 e 3, (sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento) e nas amostras 4, 5 e 6, (com pré-aquecimento no aço AISI 4140 e sem pós-aquecimento), já a Figura 9(02) refere-se as amostras 7, 8 e 9, (com pré-aquecimento no aço AISI 4140 e pós-aquecimento no conjunto soldado) mostra os procedimentos desenvolvidos.

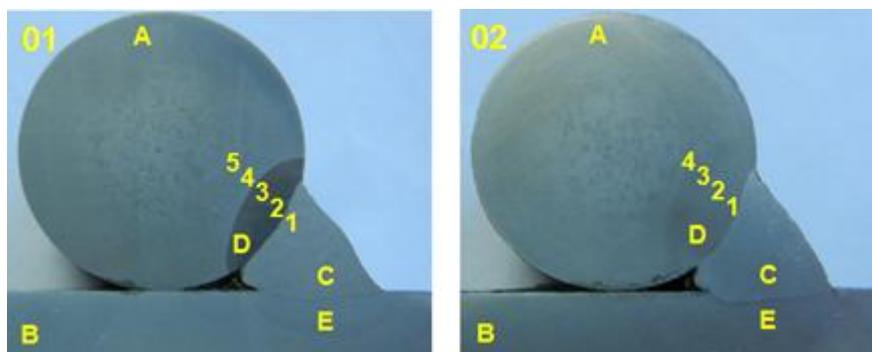


Figura 9: (A) MB AISI 4140, (B) MB ASTM A36, (C) Metal de solda, (D) ZAC AISI 4140, (E) ZAC ASTM A36. (1) 1º ponto de medição, (2) 2º ponto de medição, (3) 3º ponto de medição, (4) 4º ponto de medição, (5) 5º ponto de medição.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A apresentação dos resultados é dividida em três partes: inicialmente, os resultados referentes aos experimentos sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento; em seguida os resultados com pré-aquecimento no aço AISI 4140 e sem pós-aquecimento; e para finalizar os resultados com pré-aquecimento no aço AISI 4140 e pós-aquecimento no conjunto soldado.

4.1 EXPERIMENTOS SEM PRÉ-AQUECIMENTO E SEM PÓS-AQUECIMENTO

As Figuras 10(01), 10(02) e 10(03) apresentam, respectivamente, as macrografias das amostras soldadas com uma camada, duas camadas e três camadas de solda sem tratamento térmico anterior e posterior. As três amostras apresentaram boa fusão, porém com relação à penetração, houve maior penetração no aço ASTM A36 e pouca penetração no aço AISI 4140. A ZAC no aço AISI 4140 ficou mais visível e, possivelmente frágil devido ao alto índice de carbono equivalente existente na composição química do aço AISI 4140 e também pelo fato da alta taxa de resfriamento. Também, observa-se que o tamanho da ZAC diminuiu com o aumento do número de cordões de solda (passes).



Figura 10: Macrografia dos corpos de prova soldados sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento. (01) Um cordão de solda, (02) dois cordões de solda e (03) três cordões de solda.

Ao analisar o gráfico da Figura 11, verificou-se nas medições realizadas, que as zonas afetadas pelo calor ZAC (posição 2 e 3) do aço AISI 4140 apresentaram os valores de dureza superiores em todos os experimentos soldados sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento. Também, observou-se que as amostras soldadas com passe único apresentaram valores mais elevados de dureza (região do metal de solda e da ZAC) do que os corpos de prova com dois e três passes de solda, porém na região do metal base AISI 4140 os valores de dureza do material mantiveram-se constantes.

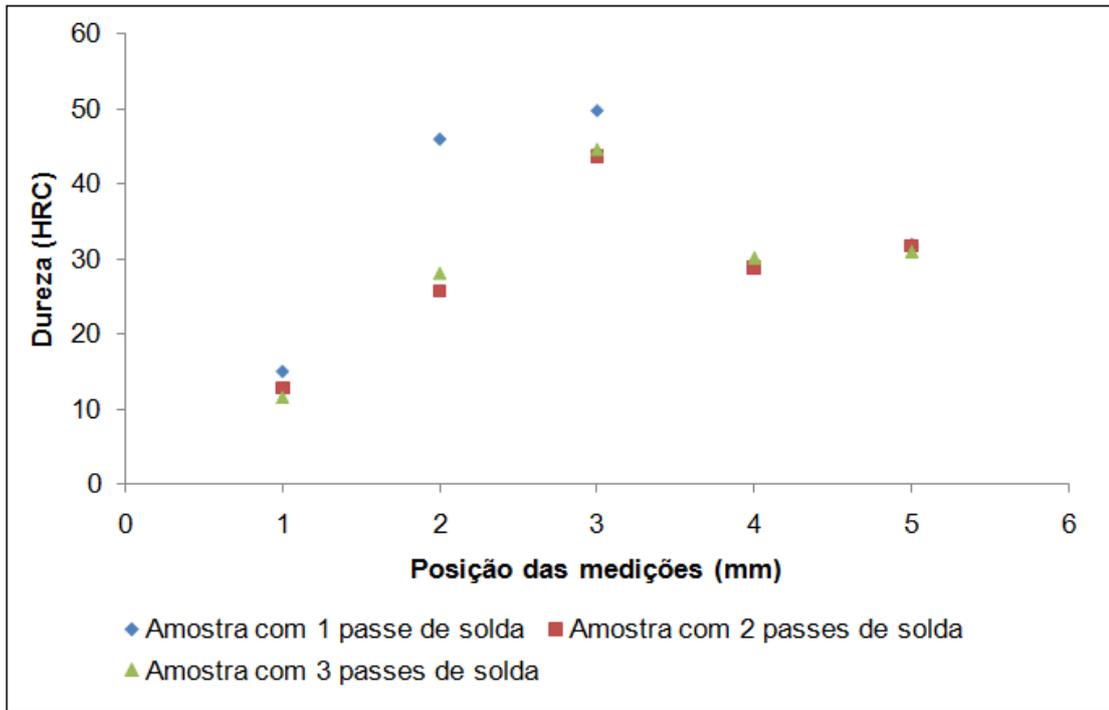


Figura 11: Perfil de dureza dos corpos de prova sem cuidados especiais.

A Figura 12(A) apresenta a microestrutura do aço AISI 4140, constituída de ferrita (partes claras) e uma grande quantidade de perlita com granulação grosseira (partes escuras), em virtude da quantidade de carbono existente. A Figura 12(B) contempla a existência de uma grande quantidade de ferrita (partes claras) e perlita (partes escuras).

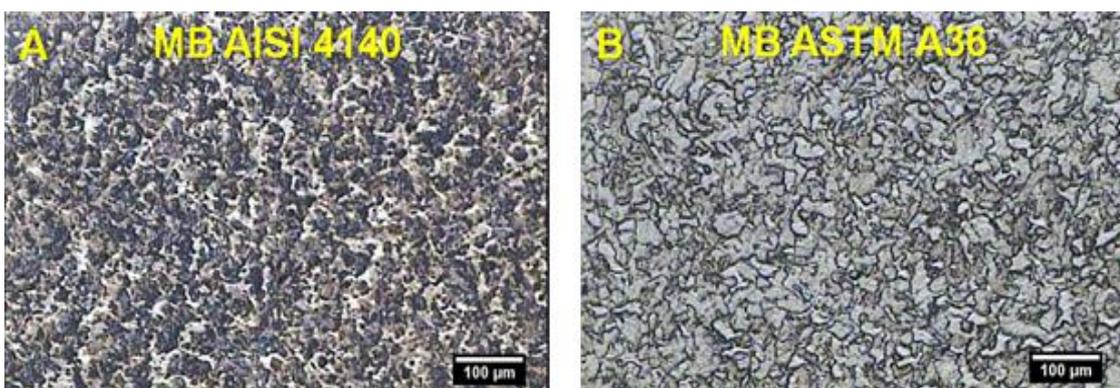


Figura 12: Micrografias com um cordão de solda sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento. (A) Metal base AISI 4140, (B) Metal base ASTM A36.

Ao observar a Figura 13(C), percebe-se a transição de fase entre o metal base e a ZAC. A microestrutura do metal base é formada por grãos grosseiros constituídos por ferrita (partes claras) e perlita (partes escuras). Na região da ZAC do aço AISI 4140, observa-se o início da transformação do material em martensita. A

Figura 13(D) contempla nas regiões do metal base ferrita (partes claras) e perlita (partes escuras). Nas regiões da ZAC do aço ASTM A36 encontra-se a existência de grãos refinados de ferrita e perlita, conseqüentemente esta região em virtude da redução dos grãos teve um aumento na resistência.

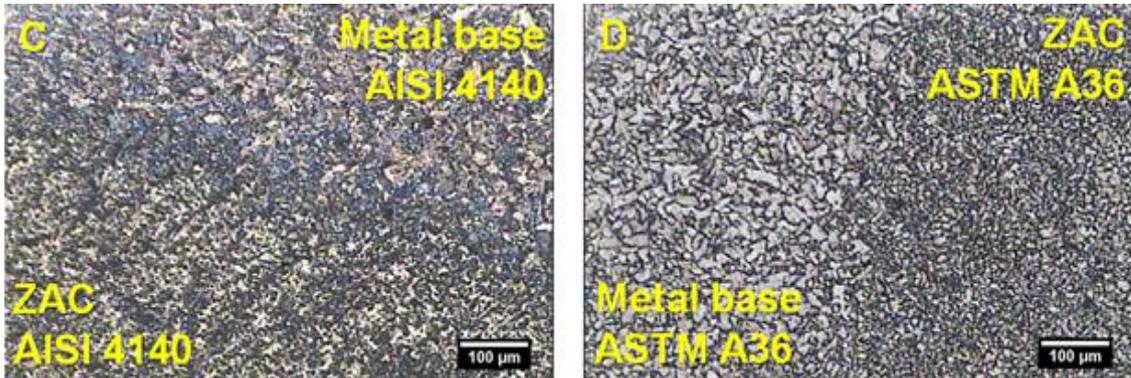


Figura 13: Micrografias com um cordão de solda sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento. (C) Metal base e ZAC 4140, (D) Metal base e ZAC ASTM A36.

A Figura 14(E) apresenta nas regiões da ZAC a formação de martensita com alta dureza, em função do alto teor de carbono existente na estrutura cristalina do aço e pelas altas velocidades de resfriamento. O metal de solda (Figura 14(E) e 14(F)) é formado por regiões dendríticas, com composição heterogênea. Na Figura 14(F), pode-se observar na região da ZAC, a presença de grãos colunares de perlita, ferrita de contorno de grão e ferrita acicular (ripas claras). Também constatou-se que quanto mais próximo do metal de solda, mais grosseira é a região da ZAC, e quanto mais próximo do metal base, maior o grau de refino dos grãos, em ambos os materiais.

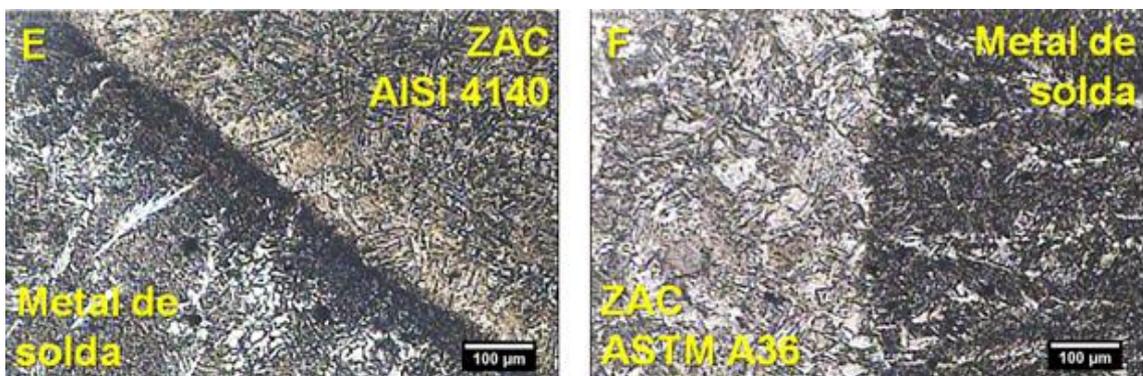


Figura 14: Micrografias com um cordão de solda sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento. (E) ZAC AISI 4140 e metal de solda, (F) ZAC ASTM A36 e metal de solda.

As Figuras 15(A) e 15(B) apresentam a transição entre o metal base e a ZAC, percebe-se nas regiões da ZAC, o crescimento de grãos numa região muito extensa,

no entanto, o aquecimento proporcionado pela energia da segunda camada, proporcionou um certo grau de refino na primeira camada. A microestrutura das regiões do metal base é composta por grãos grosseiros, constituídos, por ferrita (partes claras) e perlita (partes escuras), já a ZAC apresenta a transição do metal base em martensita.

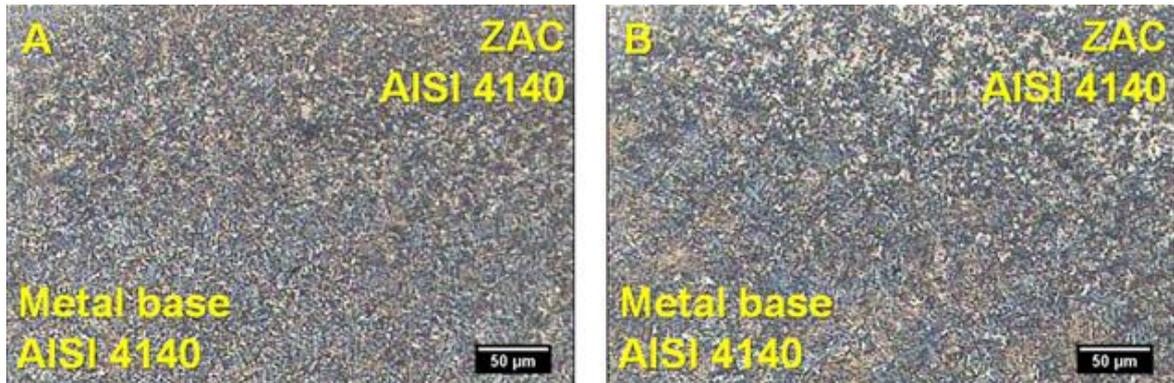


Figura 15: Micrografias com dois cordões de solda sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento. (A) Zona afetada pelo 1º passe de solda. (B) Zona afetada pelo 2º passe de solda.

As Figuras 16 (C) e 16(D) apresentam na microestrutura da ZAC a presença de grãos grosseiros formados por uma grande quantidade de martensita. Devido as ZAC do aço AISI 4140 terem se transformado em martensita, a região tornou-se uma zona frágil e dura. Ao analisar as Figuras 16(C) e 16(D), percebe-se que o aquecimento proporcionado pela energia da segunda camada, não foi suficiente para causar o grau de refino desejado na primeira camada. No metal de solda encontra-se uma composição heterogênea com a presença de regiões dendríticas.

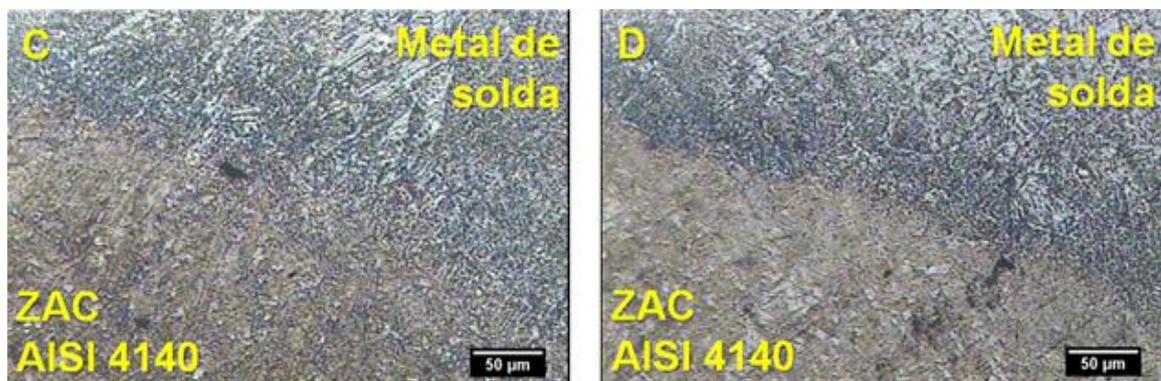


Figura 16: Micrografias com dois cordões de solda sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento. (C) Zona afetada pelo 1º passe de solda. (D) Zona afetada pelo 2º passe de solda.

Nas regiões da ZAC do aço ASTM A36, Figuras 17(E) e 17(F), encontra-se a presença de grãos refinados de perlita e ferrita em grandes quantidades. Nesta

situação, com a segunda camada de solda, conseguiu-se um pequeno grau de refinamento nas regiões da primeira camada. Em virtude da redução do tamanho dos grãos na ZAC do aço ASTM A36, essa região teve um aumento na resistência.

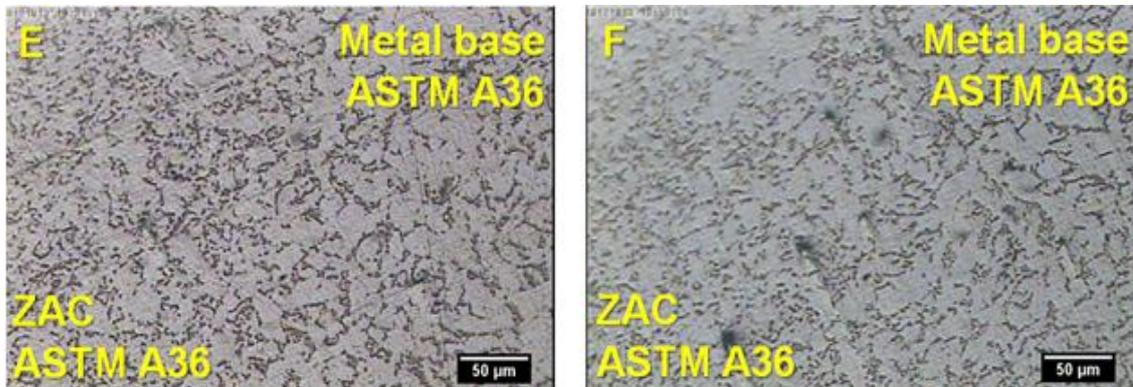


Figura 17: Micrografias com dois cordões de solda sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento. (E) Zona afetada pelo 1º passe de solda. (F) Zona afetada pelo 2º passe de solda.

Ao observar a Figura 18(G) pode-se notar a presença de grãos colunares de perlita, ferrita de contorno de grão e ferrita acicular (ripas claras). Na Figura 18(H) encontra-se ainda, ferrita primária e grãos de perlita colunares que cresceram a partir dos grãos do metal base, em virtude do calor gerado pela soldagem.

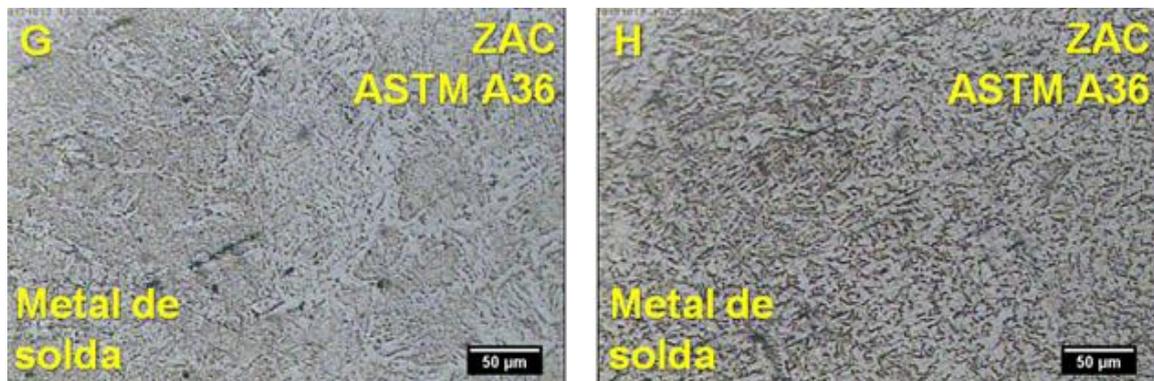


Figura 18: Micrografias com dois cordões de solda sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento. (G) Zona afetada pelo 1º passe de solda. (H) Zona afetada pelo 2º passe de solda.

Através das Figuras 19(A) e 19(B) pode-se notar a região de fusão entre o metal de solda e o metal base. O metal de solda é formado por uma composição heterogênea e por regiões dendríticas. Na Figura 19(A) verificou-se na ZAC a presença de ferrita e grãos de perlita que cresceram pelas energias geradas na soldagem a partir dos grãos do metal base. Na ZAC da Figura 19(B) observa-se a presença de colônias de perlita e ferrita com granulação grosseira.

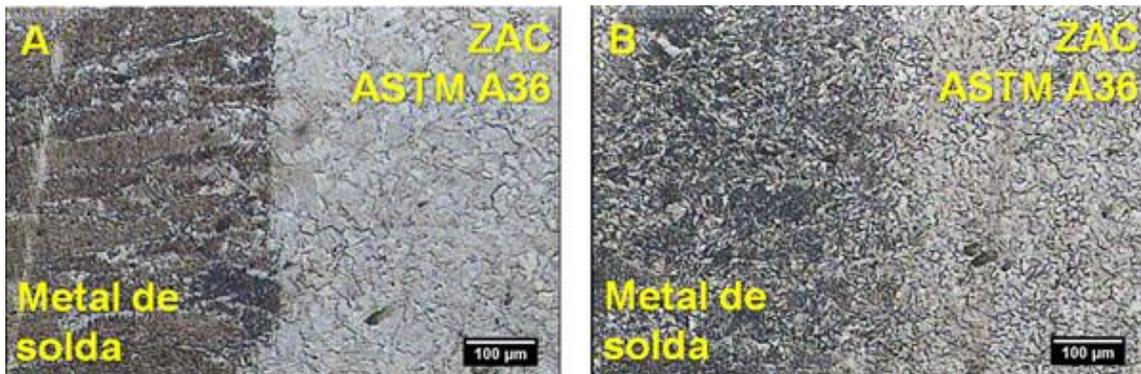


Figura 19: Micrografias com três cordões de solda sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento. (A) Zona afetada pelo 1º passe de solda. (B) Zona afetada pelo 2º passe de solda.

Foi possível identificar nas regiões da ZAC, Figura 20(C) um aumento no tamanho dos grãos. Essa ZAC é formada por perlita e uma grande quantidade de ferrita. Encontram-se regiões dendríticas com composição heterogênea no metal de solda. Na Figura 20(D), tem-se uma microestrutura formada por ferrita em abundância e pequenas quantidades de perlita, também observa-se um refino dos grãos na ZAC.

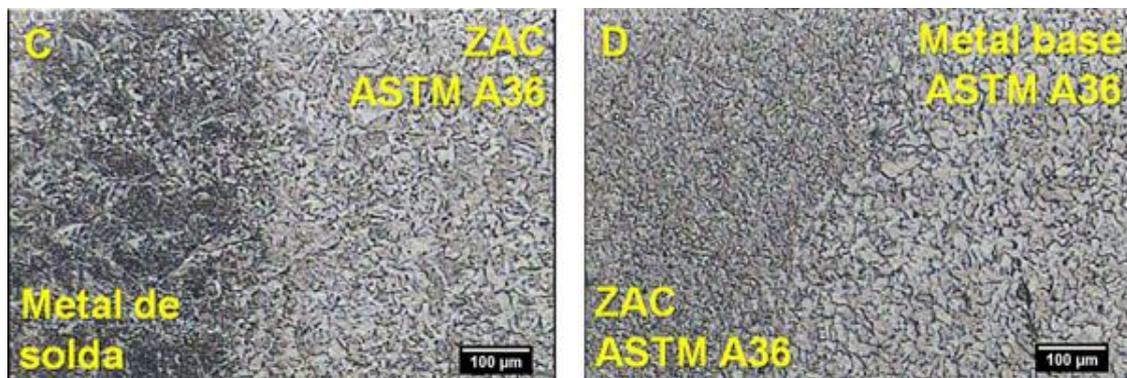


Figura 20: Micrografias com três cordões de solda sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento. (D) Zona afetada pelo 1º passe de solda. (C) Zona afetada pelo 3º passe de solda.

Nota-se nas Figuras 21(E) e 21(F), uma microestrutura formada por pequenas quantidades de perlita e grandes quantidades de ferrita. Observa-se também, uma transição de fase entre o metal base e a ZAC. As ZAC apresentam estruturas com grãos refinados, e com uma resistência maior que o metal base, em virtude do refino dos grãos.

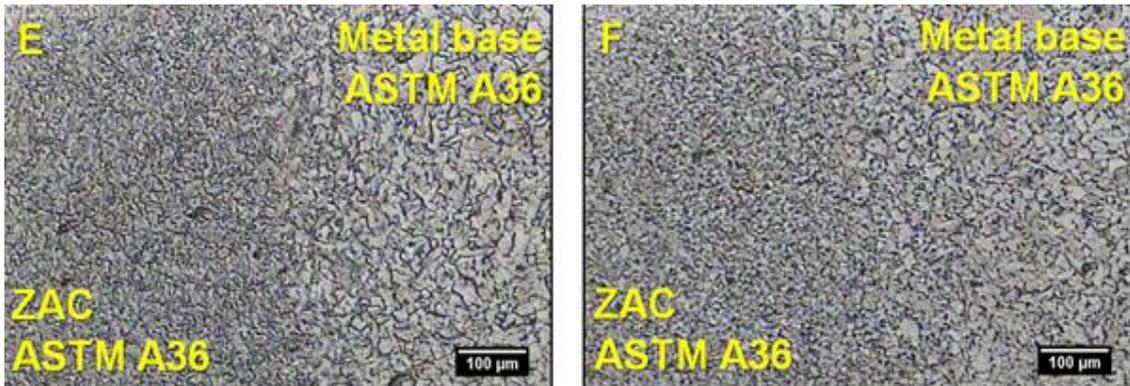


Figura 21: Micrografias com três cordões de solda sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento. (E) Zona afetada pelo 2º passe de solda. (F) Zona afetada pelo 3º passe de solda.

Com as Figuras 22(G) e 22(H) é possível identificar no metal de solda a presença de regiões dendríticas com composição heterogênea. A Figura 22(G) apresenta a transição de fase do metal base em martensita, já a ZAC da Figura 22(H) contém a microestrutura totalmente formada em martensita. Na ZAC da Figura 22(G) os grãos estão mais refinados do que a ZAC da Figura 22(H) em virtude do segundo passe de solda ter proporcionado um refino dos grãos, em função do calor gerado na soldagem.

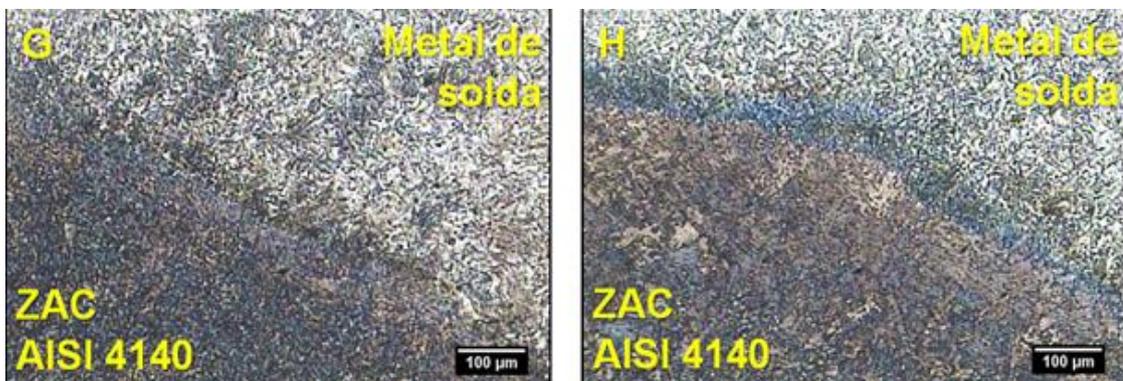


Figura 22: Micrografias com três cordões de solda sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento. (G) Zona afetada pelo 1º passe de solda. (H) Zona afetada pelo 2º passe de solda.

Na Figura 23(J) é possível identificar no metal base ferrita (partes claras) e perlita (partes escuras), já na ZAC, verificou-se a presença de grãos refinados, devido às camadas de solda anteriores. A Figura 23(I) é constituída por grãos grosseiros de martensita na ZAC devido às altas velocidades de resfriamento e pelo calor gerado durante a soldagem. O metal de solda é formado por regiões dendríticas com composição heterogênea.

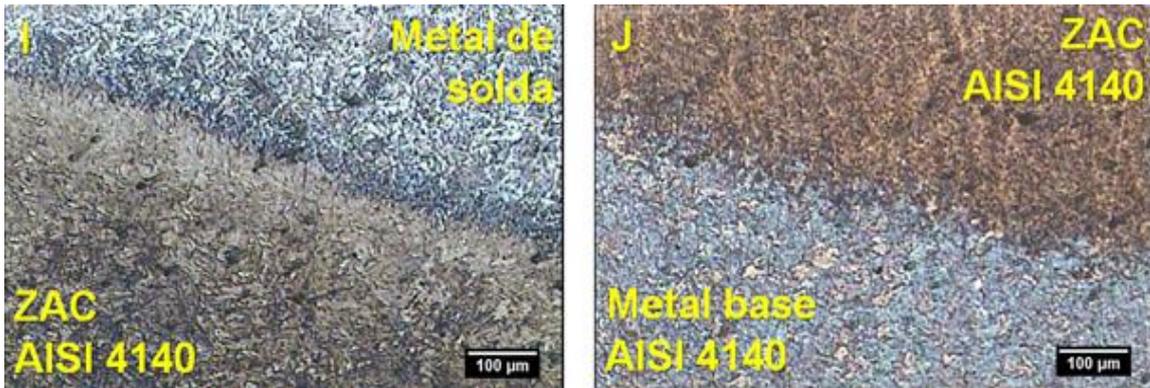


Figura 23: Micrografias com três cordões de solda sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento. (J) Zona afetada pelo 1° passe de solda. (I) Zona afetada pelo 3° passe de solda.

Nas Figuras 24(K) e 24(L) é possível identificar a presença de ferrita (partes claras) e grandes quantidades de perlita (partes escuras). Nos experimentos com as três camadas de solda, conseguiu-se um elevado grau de refino nas camadas anteriores, como consequência reduziu-se consideravelmente o tamanho dos grãos da ZAC, porém pode-se notar a presença de grãos pouco refinados na região entre passes. O ciclo térmico gerado pela segunda camada de solda teve como função refinar as ZAC-GG da primeira camada e a terceira camada consistiu em aplicar o revenimento.

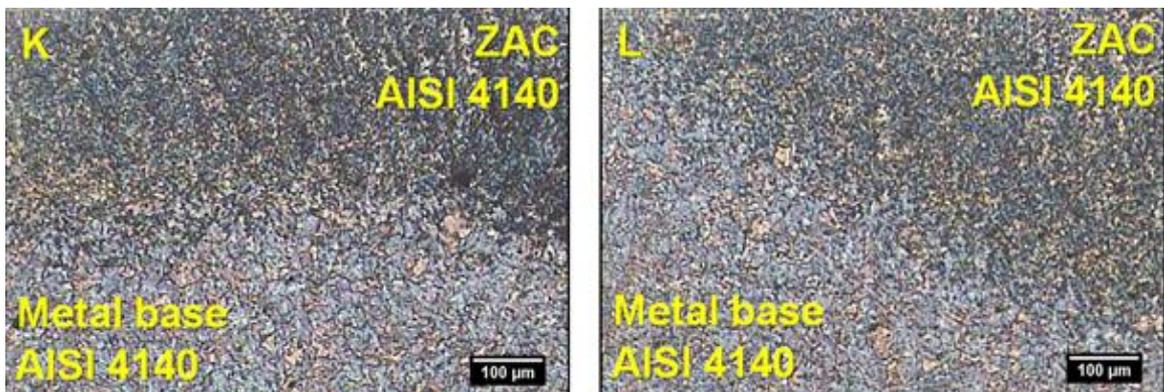


Figura 24: Micrografias com três cordões de solda sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento. (K) Zona afetada pelo 2° passe de solda. (L) Zona afetada pelo 3° passe de solda.

4.2 EXPERIMENTOS COM PRÉ-AQUECIMENTO E SEM PÓS-AQUECIMENTO

As Figuras 25(01), 25(02) e 25(03) apresentam, respectivamente, as macrografias das amostras soldadas com uma camada, duas camadas e três camadas de solda com pré-aquecimento no aço AISI 4140 e sem tratamento térmico posterior. Nestas amostras pode-se observar que o tamanho da ZAC diminuiu com

o aumento do número de cordões de solda (passes). Também, algumas discontinuidades (falta de penetração – Figura 25(01) e excesso de convexidade – Figura 25(03)) podem ser observadas nestas macrografias.

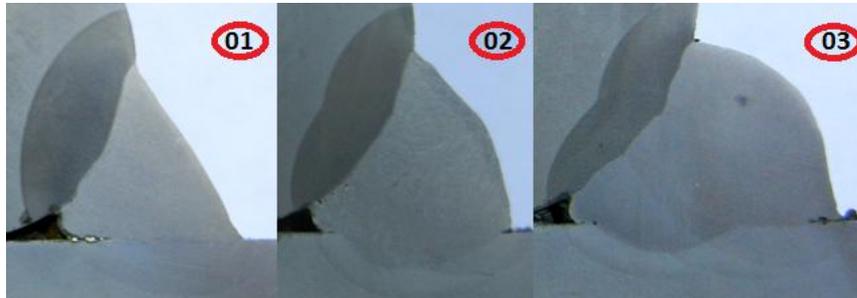


Figura 25: Macrografia dos corpos de prova soldados com pré-aquecimento e sem pós-aquecimento. (01) Um cordão de solda, (02) dois cordões de solda e (03) três cordões de solda.

A Figura 26 apresenta o gráfico de dureza das amostras com pré-aquecimento no aço AISI 4140 e sem pós-aquecimento. Nota-se no gráfico, que as regiões do metal de solda foram às regiões mais macias do conjunto soldado e que as ZAC apresentam as regiões mais duras. Ao analisar a Figura 26, percebe-se que a técnica com três camadas de solda obteve os valores mais baixos de dureza do que as amostras com um e dois passes de solda.

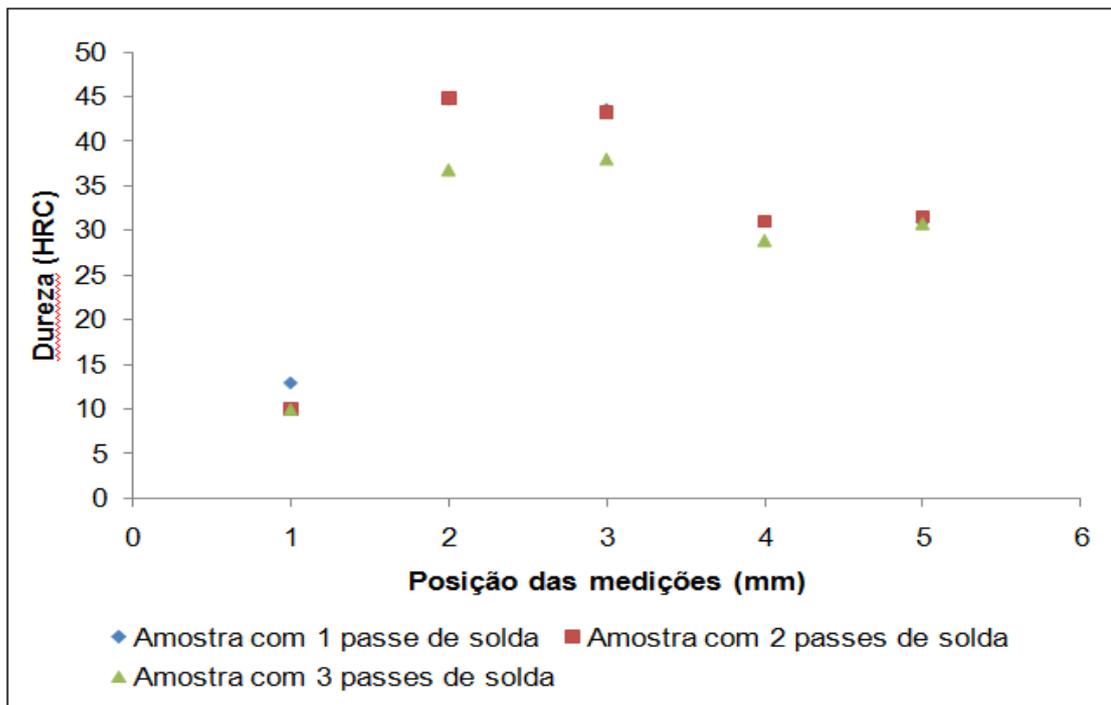


Figura 26: Perfil de dureza dos corpos de prova com pré-aquecimento.

A Figura 27(A) apresenta a microestrutura do aço AISI 4140, constituída por ferrita (partes claras) e perlita com granulação grosseira (partes escuras). A Figura 28(B) contempla a existência de ferrita (partes claras) e perlita (partes escuras) na microestrutura do aço estrutural ASTM A36.

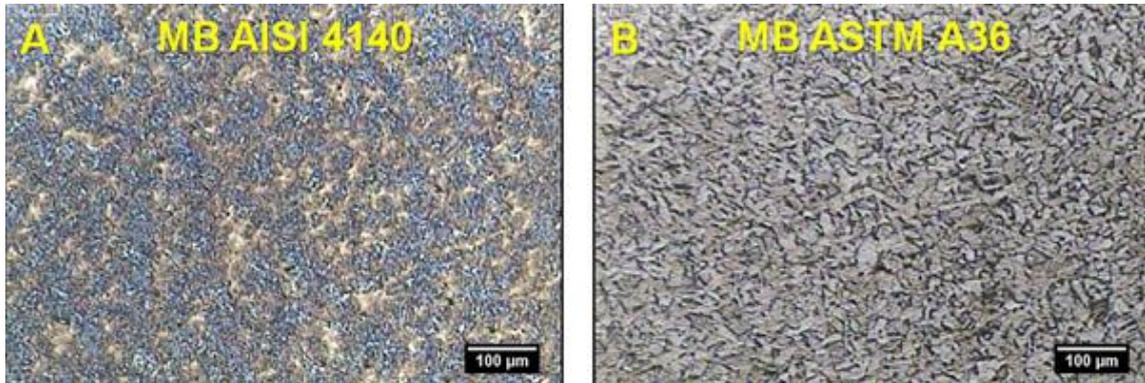


Figura 27: Micrografias com pré-aquecimento no aço AISI 4140 e com uma camada de solda. (A) Metal base AISI 4140, (B) Metal base ASTM A36.

Ao observar a Figura 28(C), percebe-se a transição de fase do metal base. A microestrutura do metal base é composta por grãos ferrita (partes claras) e perlita (partes escuras). A ZAC do aço AISI 4140 apresenta sua microestrutura parcialmente transformada em martensita. A Figura 28(D) contempla nas regiões do metal base ferrita (partes claras) e perlita (partes escuras). Nas regiões da ZAC do aço ASTM A36 (Figura28(D)) notou-se a existência de grãos refinados.

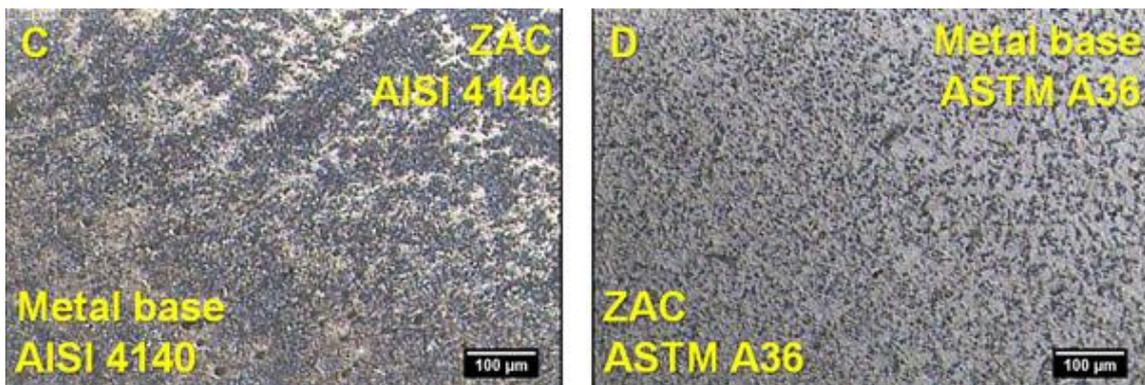


Figura 28: Micrografias com pré-aquecimento no aço AISI 4140 e com uma camada de solda. (C) Metal base e ZAC 4140, (D) Metal base e ZAC ASTM A36.

A Figura 29(E) apresenta nas regiões da ZAC a formação de martensita, em função do teor de carbono equivalente existente na estrutura cristalina do aço e pelas altas velocidades de resfriamento. Na Figura 29(F), pode-se observar na região da ZAC, a presença de grãos colunares de perlita, ferrita de contorno de grão e ferrita acicular (ripas claras). Ao analisar as Figuras 29(E) e 29(F) nota-se que

quanto mais próximo do metal de solda, mais grosseira é a região da ZAC, e quanto mais próximo do metal base, maior o refino dos grãos. O metal de solda é composto por regiões dendríticas com composição heterogênea.

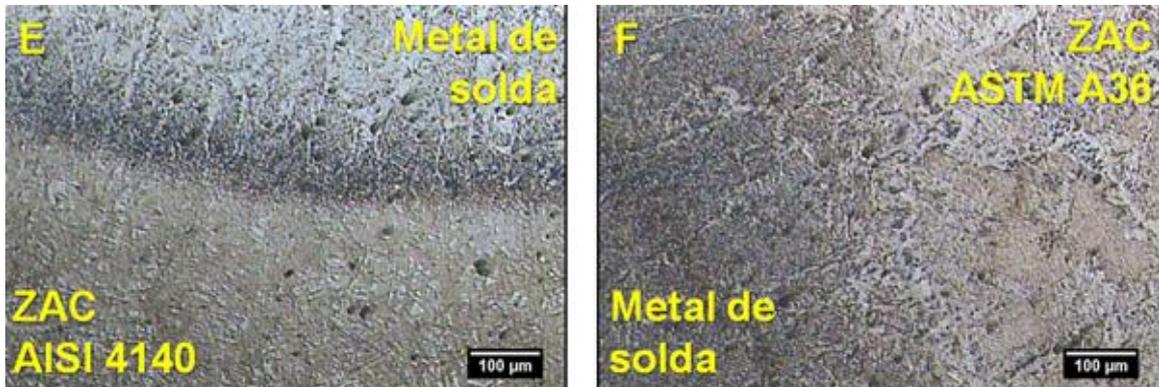


Figura 29: Micrografias com pré-aquecimento no aço AISI 4140 e com uma camada de solda. (E) Metal de solda e ZAC AISI 4140, (F) Metal de solda e ZAC ASTM A36.

Ao analisar a (Figura 30) microestrutura dos corpos de prova com pré-aquecimento percebe-se que ocorreu um refino uniforme dos grãos da ZAC-GG da primeira camada, mas na região entre passes foram encontrados grãos pouco refinados. Através do método da utilização de dupla camada, (Figura 30) percebeu-se na ZAC (região próxima da linha de fusão), a formação de um progressivo refinamento e revenimento pelo efeito do ciclo térmico de soldagem. As Figuras 30(A), 30(B) contam com a presença de martensita e austenita retida na ZAC.

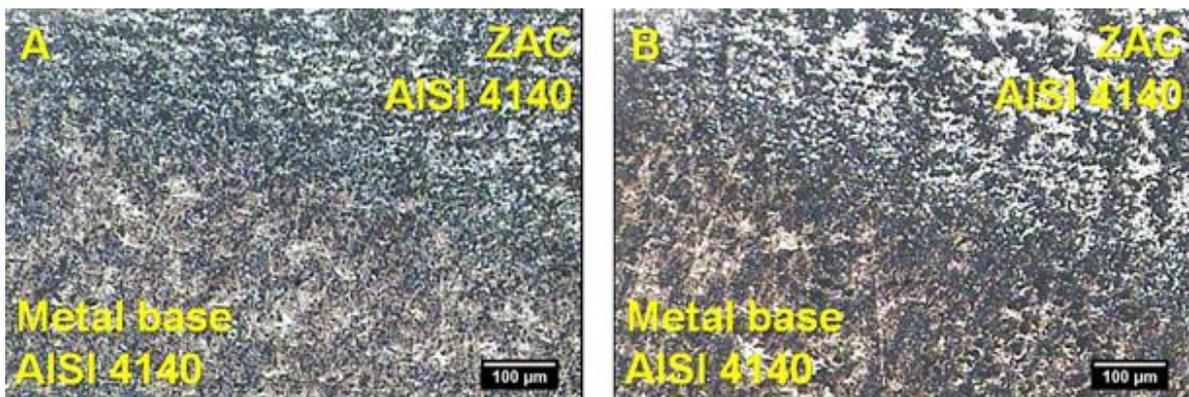


Figura 30: Micrografias com pré-aquecimento no aço AISI 4140 e com duas camadas de solda. (A) Zona afetada pelo 1º passe de solda. (B) Zona afetada pelo 2º passe de solda.

Com as Figuras 31(C) e 31(D), é possível identificar no metal de solda regiões dendríticas com composição heterogênea, já na ZAC, verifica-se a presença de martensita. Ao analisar as Figuras 31(C) e 31(D) percebe-se um pequeno refino de grãos na ZAC resultante do primeiro passe de solda, em virtude do uso da técnica

da dupla camada de solda, no entanto, o aquecimento proporcionado pela energia da segunda camada, não foi suficiente para causar o grau de refino desejado na primeira camada.

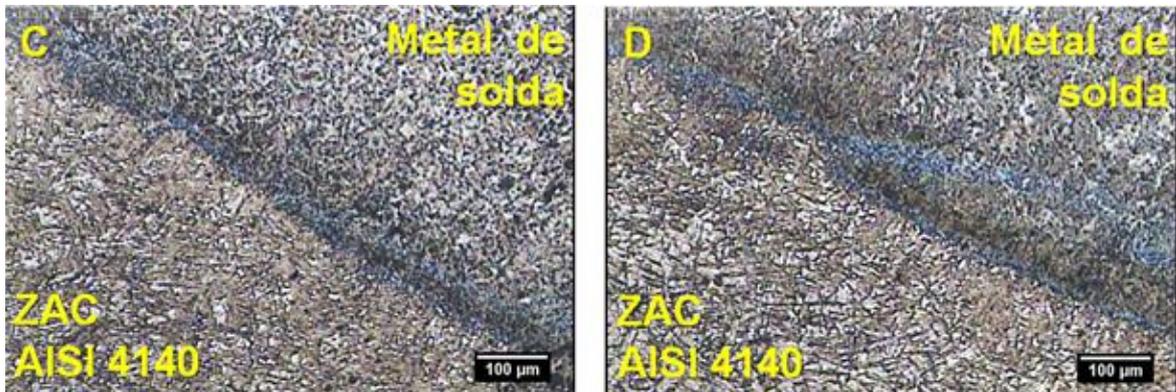


Figura 31: Micrografias com pré-aquecimento no aço AISI 4140 e com duas camadas de solda. (C) Zona afetada pelo 1° passe de solda. (D) Zona afetada pelo 2° passe de solda.

Nas regiões da ZAC do aço ASTM A36, Figuras 32(E) e 32(F), observa-se a transformação de fase do metal base com a presença de grãos refinados de ferrita e perlita. Com a aplicação da segunda camada de solda nos aços, surgiu-se nas regiões da primeira camada, um pequeno refino dos grãos. Em virtude do acontecido às zonas refinadas adquiriram um pequeno aumento na resistência do material.

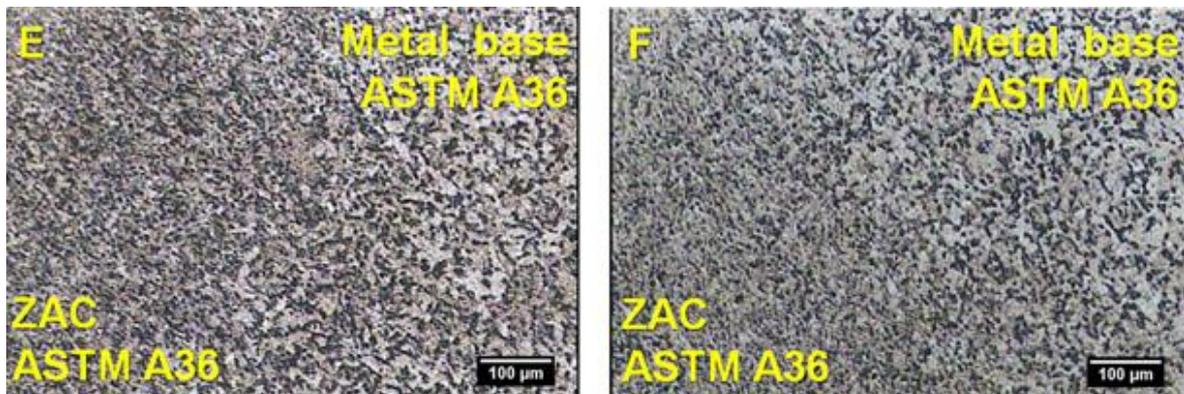


Figura 32: Micrografias com pré-aquecimento no aço AISI 4140 e com duas camadas de solda. (E) Zona afetada pelo 1° passe de solda. (F) Zona afetada pelo 2° passe de solda.

Nas Figuras 33(G) e 33(H) tem-se a fase de transformação entre a zona de fusão do metal base com o metal de solda. No metal de solda verifica-se a presença de regiões dendríticas, com composição heterogênea. A ZAC é formada por grandes colônias de ferrita (partes claras) e pequenas quantidades de perlita (partes escuras) que em virtude do calor gerado na soldagem, proporcionaram um aumento

considerável no tamanho dos grãos. As regiões refinadas da ZAC apresentam um aumento importante na resistência.

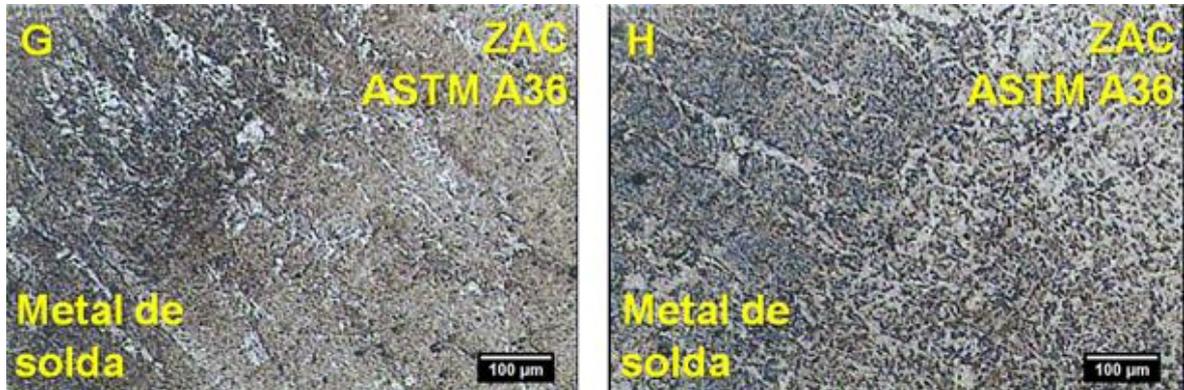


Figura 33: Micrografias com pré-aquecimento no aço AISI 4140 e com duas camadas de solda. (G) Zona afetada pelo 1° passe de solda. (H) Zona afetada pelo 2° passe de solda.

As Figuras 34(A) e 34(B) apresentam em sua microestrutura a presença de grãos de perlita colunares que cresceram a partir dos grãos do metal base (na mesma direção cristalográfica) e ferrita primária. No metal de solda encontra-se uma composição heterogênea com regiões dendríticas.

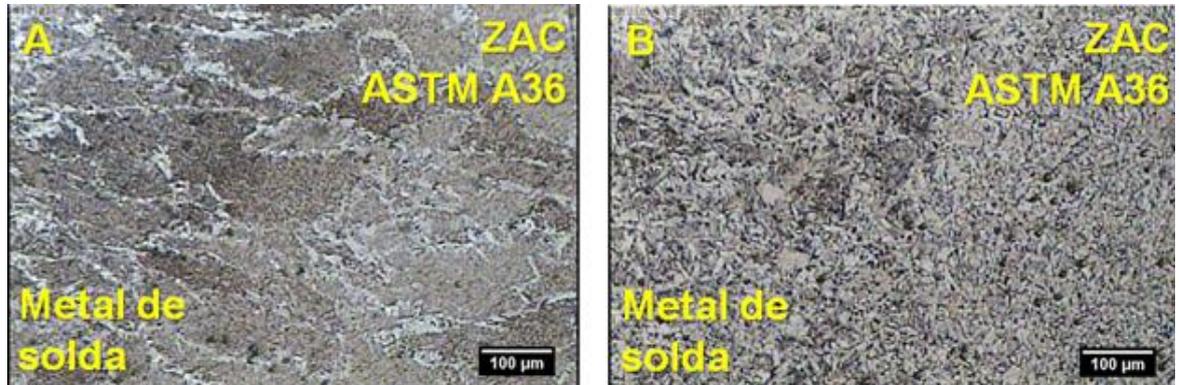


Figura 34: Micrografias com três camadas de solda e pré-aquecimento no aço AISI 4140. (A) Zona afetada pelo 1° passe de solda. (B) Zona afetada pelo 2° passe de solda.

Verificou-se na Figura 35(C), a presença de ferrita e perlita na composição química do aço ASTM A36. No metal de solda nota-se uma composição heterogênea com presença de regiões dendríticas. Comparando as ZAC das Figuras 35(C) e 35(D) percebe-se que quanto mais próximo do metal de solda maior o tamanho dos grãos, já saindo dessa região e indo em direção ao metal base nota-se um refino considerável nos grãos. Conseqüentemente, quanto maior o grau de refino do material maior a resistência.

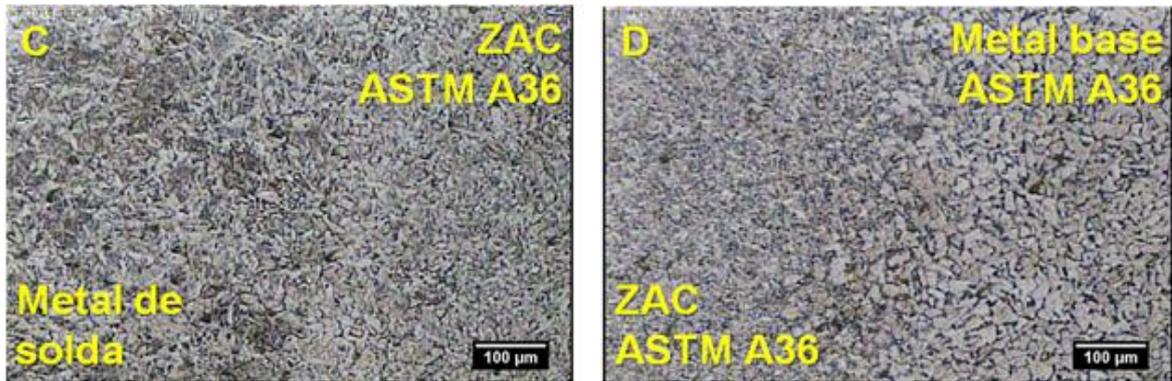


Figura 35: Micrografias com três camadas de solda e pré-aquecimento no aço AISI 4140. (D) Zona afetada pelo 1° passe de solda. (C), Zona afetada pelo 3° passe de solda.

Nas Figuras 36(E) e 36(F), nota-se a presença colônias de ferrita e perlita. As ZAC em função do calor gerado pela soldagem obtiveram estruturas com grãos refinados. O metal base não sofreu alteração microestrutural, portanto, manteve suas propriedades mecânicas. Nota-se no metal base uma granulação grosseira, quando comparada com a ZAC.

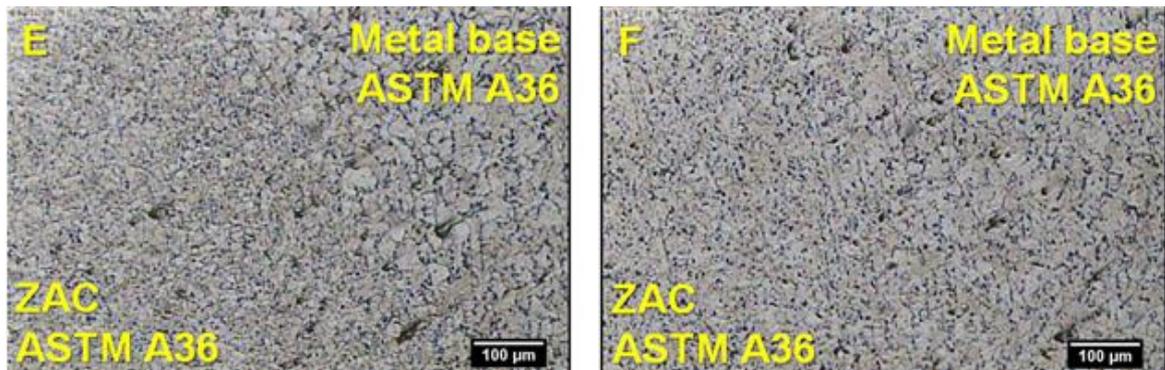


Figura 36: Micrografias com três camadas de solda e pré-aquecimento no aço AISI 4140. (E) Zona afetada pelo 2° passe de solda. (F) Zona afetada pelo 3° passe de solda.

É possível verificar que as soldagens com três camadas proporcionaram um elevado grau de refino na ZAC-GG. Percebe-se também que o ciclo térmico da segunda camada realizou o refino da ZAC-GG da primeira camada e a terceira camada realizou o revenimento. Com as Figuras 37(G) e 37(H), é possível identificar no metal de solda regiões dendríticas com composição heterogênea, já na ZAC do metal base, verifica-se a presença de martensita. As regiões da ZAC resultantes da segunda camada obtiveram grãos maiores do que as regiões afetadas pelo primeiro passe de solda.

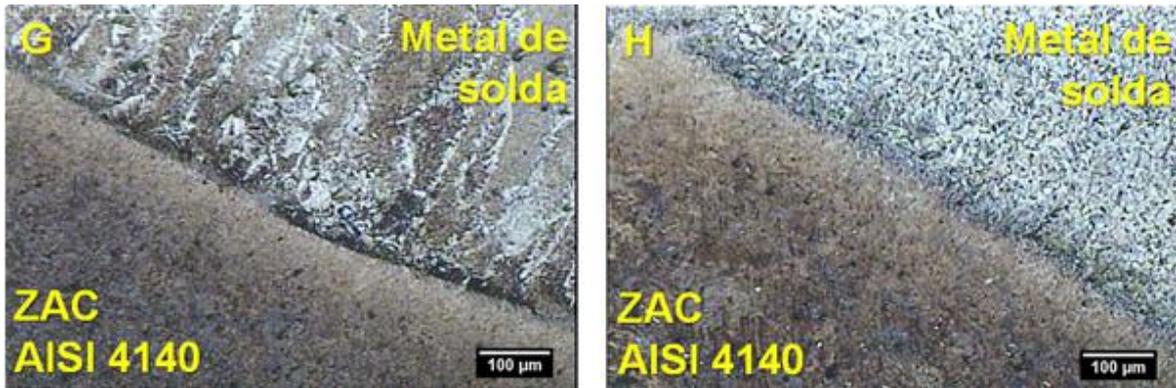


Figura 37: Micrografias com três camadas de solda e pré-aquecimento no aço AISI 4140. (G) Zona afetada pelo 1° passe de solda. (H) Zona afetada pelo 2° passe de solda.

Nas juntas unidas por soldas multipasses, a microestrutura dos aços é ainda mais complexa, por ser formada por regiões reaquecidas e alteradas pelos ciclos térmicos dos passes seguintes e por regiões que permaneceram basicamente inalteradas (MODENESI, 2004). Na Figura 38(J) é possível identificar no metal base ferrita (partes claras) e perlita (partes escuras), já na ZAC, verificou-se a presença de grãos refinados, devido às camadas de solda anteriores. A Figura 38(I), nas regiões da ZAC, apresenta a presença de martensita, porém no metal de solda encontra-se uma composição heterogênea com regiões dendríticas.

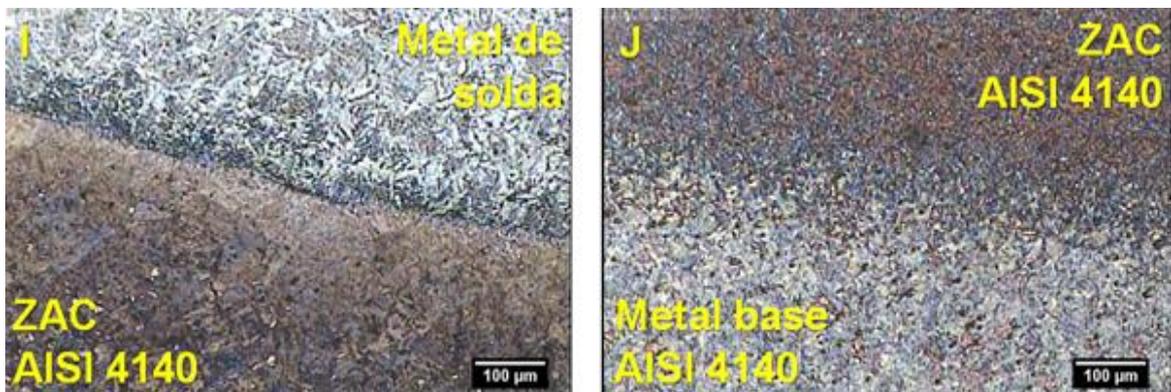


Figura 38: Micrografias com três camadas de solda e pré-aquecimento no aço AISI 4140. (J) Zona afetada pelo 1° passe de solda. (I) Zona afetada pelo 3° passe de solda.

Nas Figuras 39(K) e 39(L) é possível identificar a presença de ferrita (partes claras) e perlita (partes escuras). Nos experimentos com as três camadas de solda, conseguiu-se um elevado grau de refino nas camadas anteriores, como consequência reduziu-se consideravelmente o tamanho dos grãos da ZAC, porém pode-se notar a presença de grãos pouco refinados na região entre passes. O ciclo térmico da segunda camada gerou um certo grau de refino na ZAC-GG da primeira camada e a terceira camada serviu como revenimento.

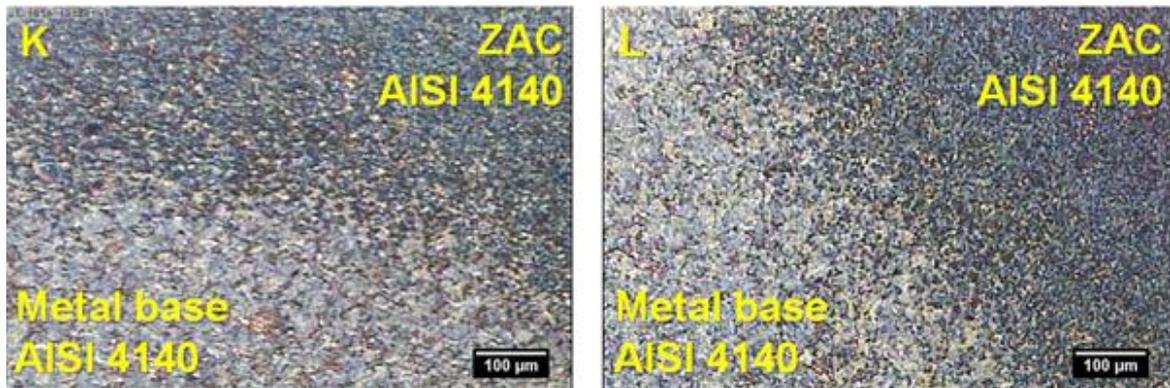


Figura 39: Micrografias com três camadas de solda e pré-aquecimento no aço AISI 4140. (K) Zona afetada pelo 2º passe de solda. (L) Zona afetada pelo 3º passe de solda.

4.3 EXPERIMENTOS COM PRÉ-AQUECIMENTO E PÓS-AQUECIMENTO

As Figuras 40(01), 40(02) e 40(03) apresentam, respectivamente, as macrografias das amostras soldadas com uma camada, duas camadas e três camadas de solda com pré-aquecimento no aço AISI 4140 e pós-aquecimento no conjunto soldado. Nestas amostras observa-se uma possível extinção da ZAC e, conseqüentemente, eliminação de uma região frágil da solda.



Figura 40: Macrografia dos corpos de prova soldados com pré-aquecimento e pós-aquecimento. (01) Um cordão de solda, (02) dois cordões de solda e (03) três cordões de solda.

Neste experimento, em virtude do pós-aquecimento no conjunto soldado, houve um processo de revenimento nos materiais, devido ao resfriamento lento (dentro do forno). Portanto, nesta etapa, os pontos que apresentam uma dureza mais elevada, são às regiões do metal base AISI 4140. Ao analisar o gráfico da Figura 41, é possível verificar que as técnicas com simples depósito de solda e com três passes de solda apresentam valores de dureza inferiores na ZAC. Já a técnica com dupla camada tornou-se menos eficiente nesta condição, porém as três condições apresentam menores valores de dureza na ZAC do aço AISI 4140, em função do pós-aquecimento.

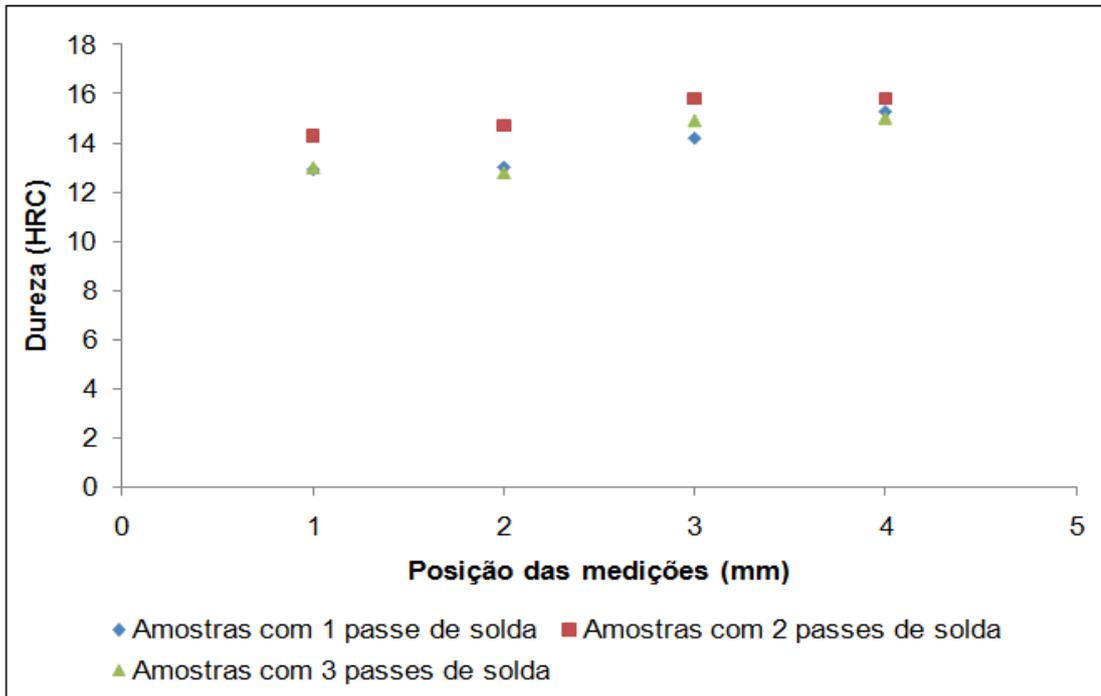


Figura 41: Perfil de dureza dos corpos com pré-aquecimento e pós-aquecimento.

A Figura 42(A) apresenta a microestrutura do aço AISI 4140 recristalizada, constituída de ferrita (partes claras) e grandes quantidades de perlita (partes escuras). A Figura 42(B) contempla a existência de grandes quantidades de ferrita (partes claras) e perlita (partes escuras) em menores quantidades.

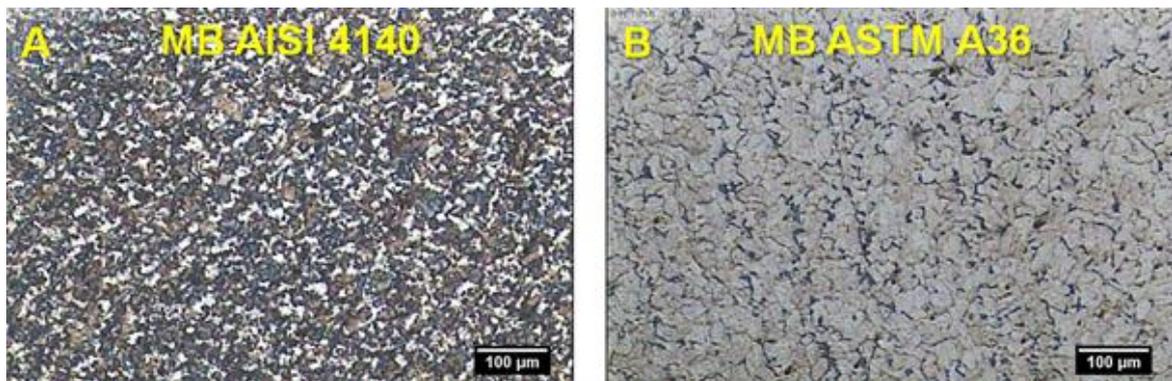


Figura 42: Micrografias com uma camada de solda, pré-aquecimento no aço AISI 4140 e pós-aquecimento no conjunto soldado. (A) Metal base AISI 4140, (B) Metal base ASTM A36.

A Figura 43(C) apresenta a microestrutura do aço AISI 4140, constituída de ferrita (partes claras) e perlita (partes escuras). A Figura 43(D) contempla a existência de ferrita (partes claras) e perlita (partes escuras). Ao analisar as Figuras 43(C) e 43(D) percebe-se que as regiões da ZAC apresentam uma pequena redução no tamanho dos grãos. Nesta situação, o metal base é composto por grãos maiores do que a ZAC, devido o pós-aquecimento ter realizado um processo de revenimento

e recuperado as microestruturas dos materiais, ou seja, eliminaram-se as zonas frágeis resultantes do processo de soldagem.

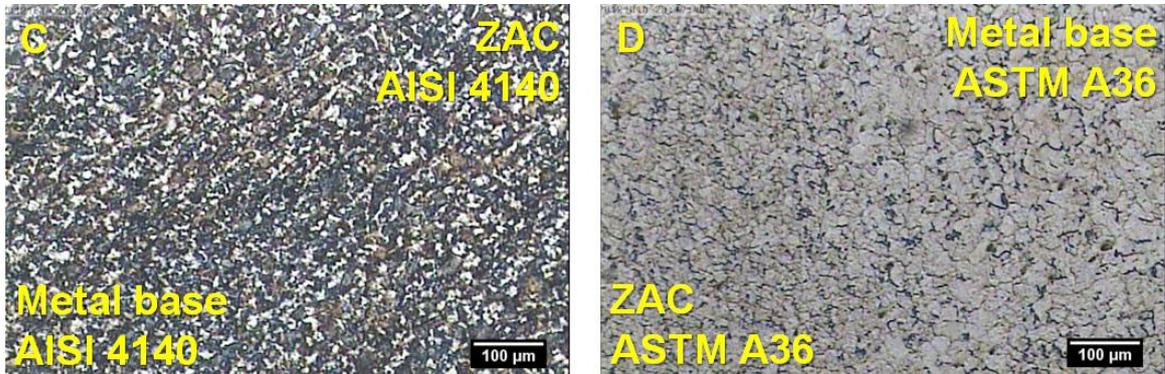


Figura 43: Micrografias com uma camada de solda, pré-aquecimento no aço AISI 4140 e pós-aquecimento no conjunto soldado. (C) Metal base e ZAC 4140, (D) ZAC e metal base ASTM A36.

A Figura 44(E) apresenta a ZAC constituída de ferrita (partes claras) e perlita com granulação grosseira (partes escuras). Nas regiões da ZAC do aço ASTM A36 (Figura 44(F)) observa-se a presença de ferrita primária e grãos de perlita colunares, que cresceram a partir dos grãos do metal de base. Com as Figuras 44(E) e 44(F) é possível observar no metal de solda a presença de regiões dendríticas (formada por impurezas e elementos de liga) com composição heterogênea.

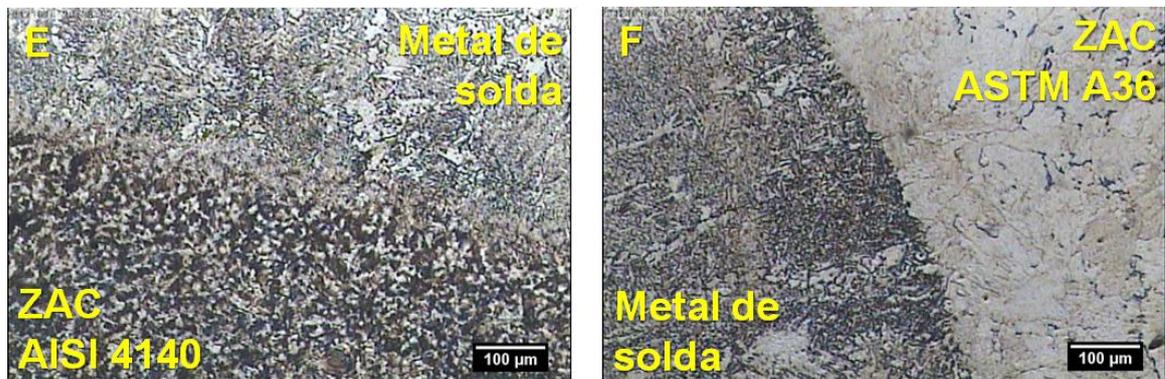


Figura 44: Micrografias com uma camada de solda, pré-aquecimento no aço AISI 4140 e pós-aquecimento no conjunto soldado. (E) Metal de solda e ZAC AISI 4140, (F) Metal de solda e ZAC ASTM A36.

As Figuras 45(A) e 45(B) apresentam a transição do metal base para a ZAC. A microestrutura do aço AISI 4140 é formada por ferrita (partes claras) e perlita em grandes quantidades (partes escuras). Observa-se também um pequeno crescimento de grãos nas regiões da ZAC, porém cabe salientar que em função do uso da técnica da dupla camada, as regiões afetadas pela primeira camada

obtiveram uma redução no tamanho dos grãos, quando comparado com as regiões afetadas pelo segundo passe de solda.

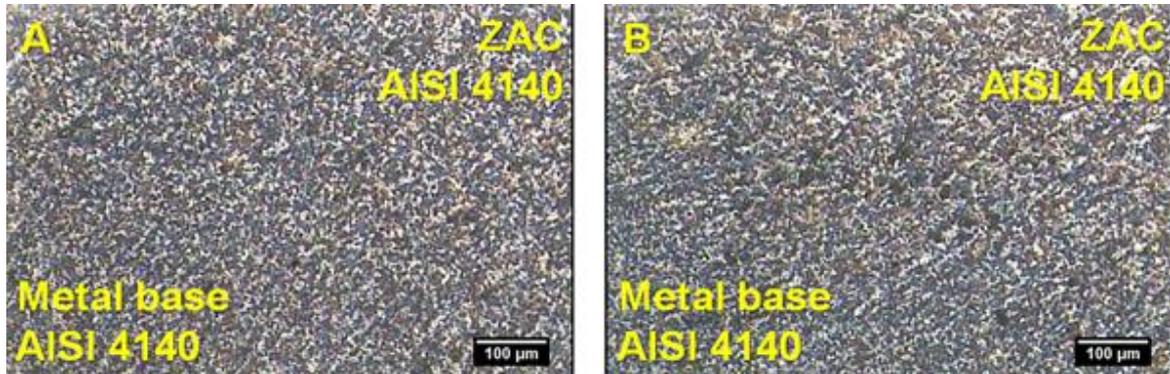


Figura 45: Micrografias com duas camadas de solda, pré-aquecimento no aço AISI 4140 e pós-aquecimento no conjunto soldado. (A) Zona afetada pelo 1º passe de solda. (B) Zona afetada pelo 2º passe de solda.

As Figuras 46(C) e 46(D) compõem uma microestrutura composta por ferrita (partes claras) e perlita (partes escuras). Observa-se também o crescimento de grãos na ZAC. O metal de solda é formado por uma composição heterogênea constituída por grãos recuperados, compostos por ferrita e perlita, em função do revenido.

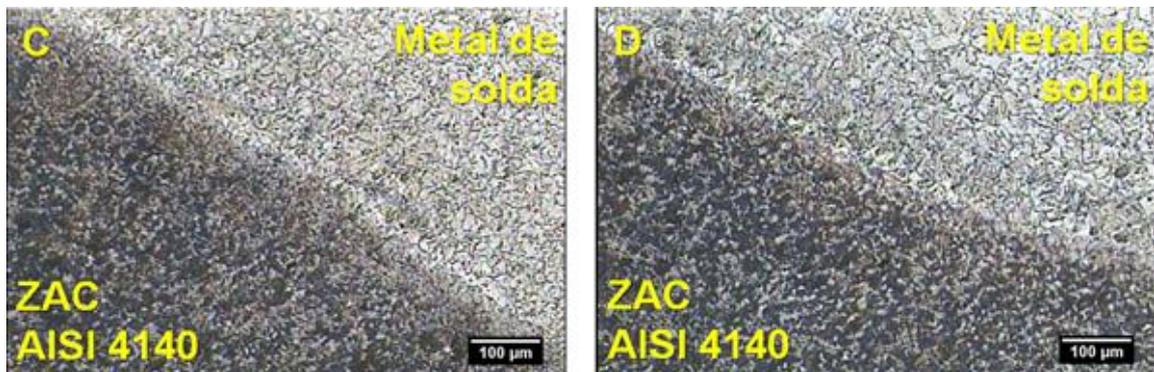


Figura 46: Micrografias com duas camadas de solda, pré-aquecimento no aço AISI 4140 e pós-aquecimento no conjunto soldado. (C) Zona afetada pelo 1º passe de solda. (D) Zona afetada pelo 2º passe de solda.

As Figuras 47(E) e 47(F) contemplam a existência de grandes quantidades de ferrita (partes claras) e perlita (partes escuras). Nas regiões da ZAC notou-se a existência de grãos refinados, já as regiões do metal base apresentam grãos maiores. As ZAC do metal base apresentam maior resistência em função dos grãos refinados.

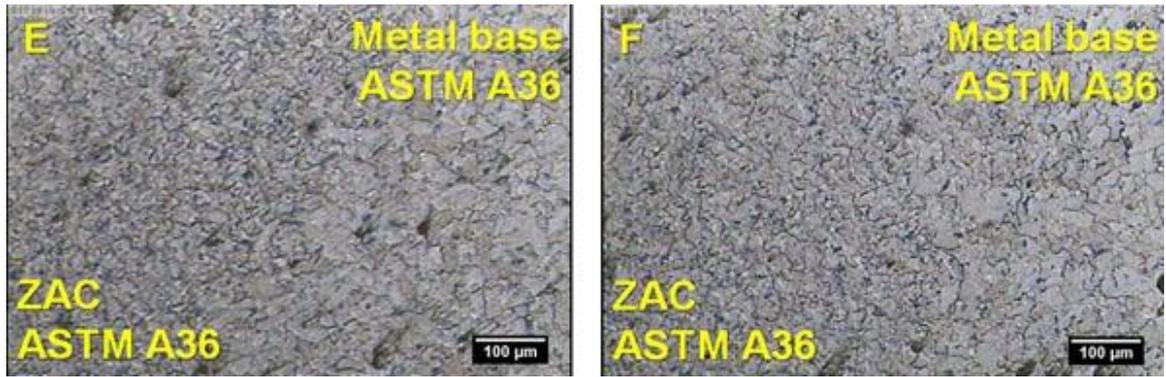


Figura 47: Micrografias com duas camadas de solda, pré-aquecimento no aço AISI 4140 e pós-aquecimento no conjunto soldado. (E) Zona afetada pelo 1° passe de solda. (F) Zona afetada pelo 2° passe de solda.

As Figuras 48(G) e 48(H) apresentam no metal de solda a presença de regiões dendríticas com composição totalmente heterogênea formada por grãos recuperados, compostos por ferrita e perlita, em função do revenido. Nas regiões da ZAC do aço ASTM A36 observa-se a presença de ferrita primária e grãos de perlita colunares, que cresceram a partir dos grãos do metal base.

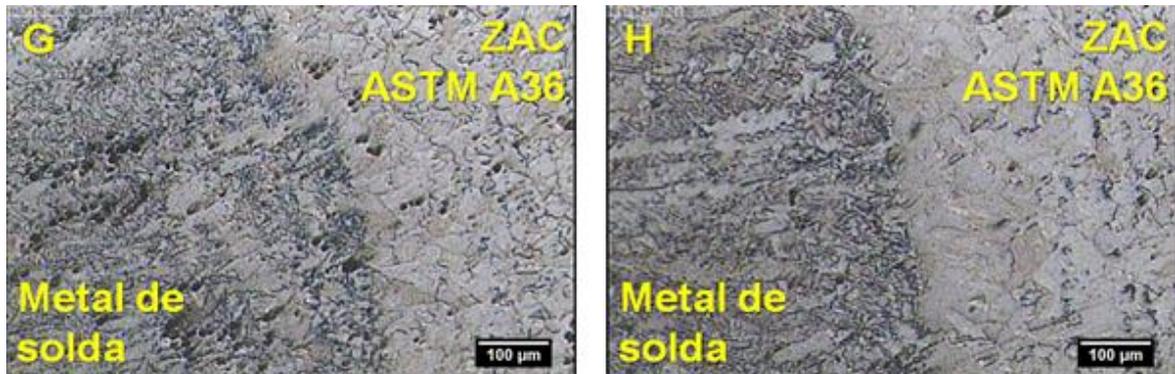


Figura 48: Micrografias com duas camadas de solda, pré-aquecimento no aço AISI 4140 e pós-aquecimento no conjunto soldado. (G) Zona afetada pelo 1° passe de solda. (H) Zona afetada pelo 2° passe de solda.

Ao observar as Figuras 49(A) e 49(B), verifica-se no metal de solda a presença de regiões dendríticas com composição totalmente heterogênea formada por grãos recuperados, compostos por ferrita e perlita, em função do revenido. Nas regiões da ZAC do aço ASTM A36 observa-se a presença de ferrita primária e grãos de perlita colunares, que cresceram a partir dos grãos do metal base.

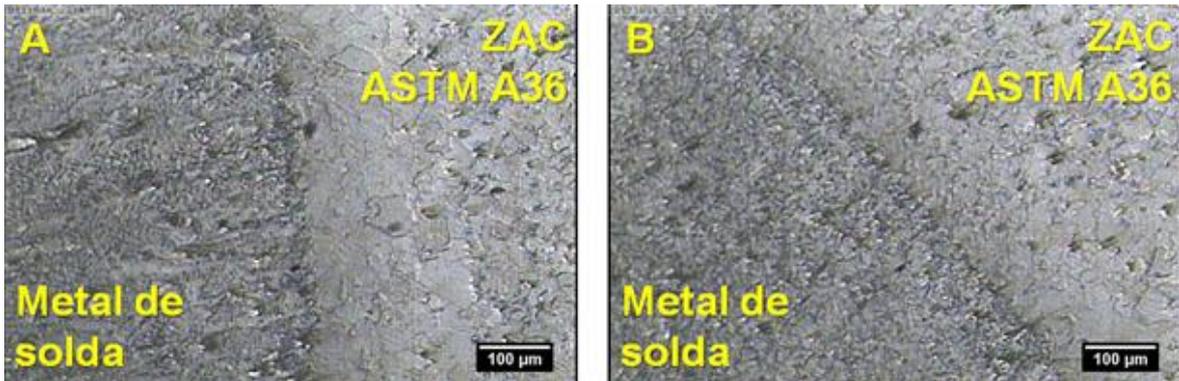


Figura 49: Micrografias com três camadas de solda, pré-aquecimento no aço AISI 4140 e pós-aquecimento no conjunto soldado. (A) Zona afetada pelo 1° passe de solda. (B) Zona afetada pelo 2° passe de solda.

As Figuras 50(C) e 50(D) contemplam a existência de ferrita (partes claras) e perlita (partes escuras). A ZAC da Figura 50(C) apresenta uma região formada por ferrita primária e grãos de perlita colunares, que cresceram a partir dos grãos do metal base. O metal de solda apresenta uma composição heterogênea formada por grãos recuperados, compostos por ferrita e perlita, em função do revenido. Na Figura 50(D) observa-se a transição de fase entre o metal base e a ZAC, nota-se nas regiões da ZAC um pequeno refinamento de grãos em relação ao metal base.

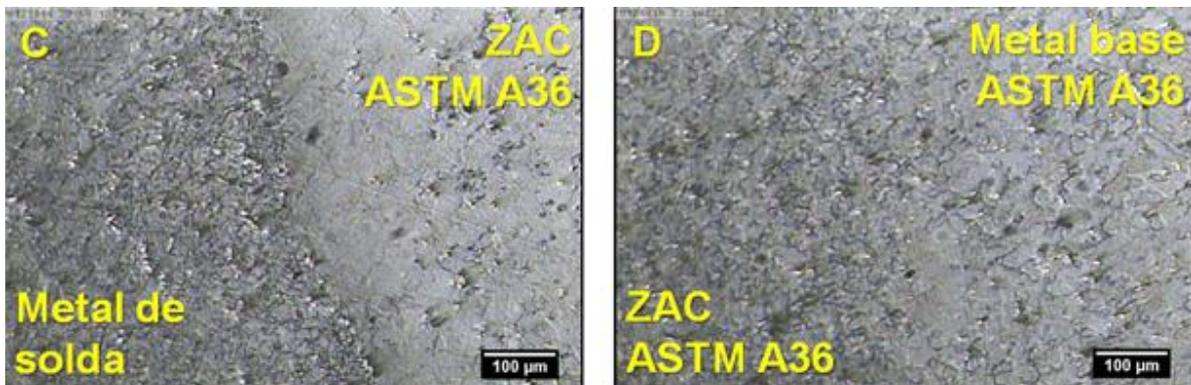


Figura 50: Micrografias com três camadas de solda, pré-aquecimento no aço AISI 4140 e pós-aquecimento no conjunto soldado. (D) Zona afetada pelo 1° passe de solda. (C) Zona afetada pelo 3° passe de solda.

As Figuras 51(E) e 51(F) contemplam a existência de ferrita (partes claras) e perlita (partes escuras). Ao analisar as Figuras 51(E) e 51(F) percebe-se a transição de fase entre o metal base e a ZAC. Nota-se nas regiões da ZAC um pequeno refinamento de grãos em relação ao metal base.

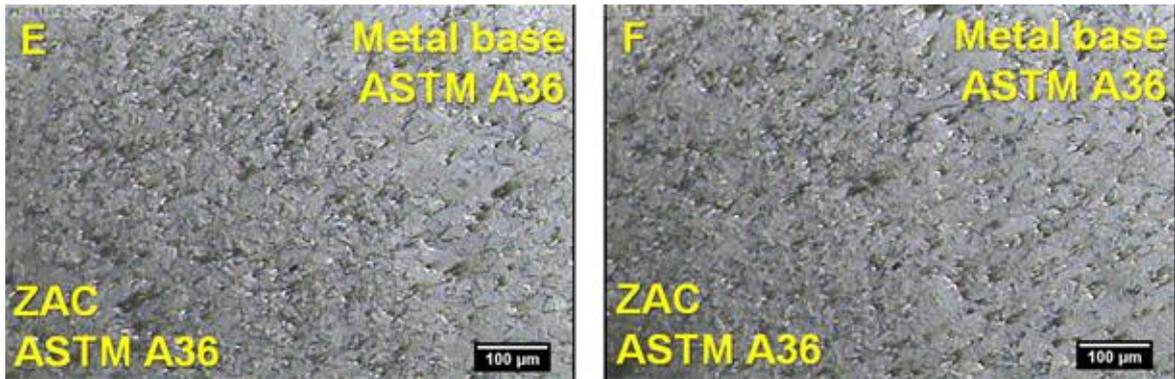


Figura 51: Micrografias com três camadas de solda, pré-aquecimento no aço AISI 4140 e pós-aquecimento no conjunto soldado. (E) Zona afetada pelo 2º passe de solda. (F) Zona afetada pelo 3º passe de solda.

As Figuras 52(G) e 52(H) apresentam na microestrutura do aço AISI 4140, ferrita (partes claras) e perlita (partes escuras). Observa-se também, um pequeno crescimento de grãos na ZAC. O metal de solda deste experimento é constituído por uma composição heterogênea formada por grãos recuperados, compostos por ferrita e perlita, em função do revenido.

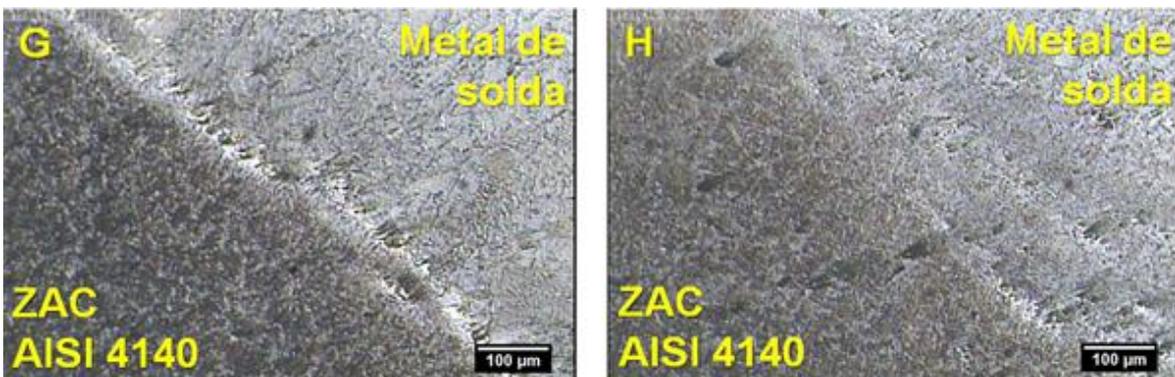


Figura 52: Micrografias com três camadas de solda, pré-aquecimento no aço AISI 4140 e pós-aquecimento no conjunto soldado. (G) Zona afetada pelo 1º passe de solda. (H) Zona afetada pelo 2º passe de solda.

A Figura 53(I) apresenta uma microestrutura formada por ferrita (partes claras) e perlita (partes escuras). Observa-se um pequeno crescimento de grãos na ZAC. O metal de solda apresenta-se com composição heterogênea formada por grãos recuperados, compostos por ferrita e perlita, em função do revenido. Na Figura 53(J) ocorre a fase de transição entre o metal base e a ZAC. Percebe-se nas regiões da ZAC um pequeno refino de grãos em relação ao metal base, em virtude desta situação, essas regiões obtiveram um aumento na resistência.

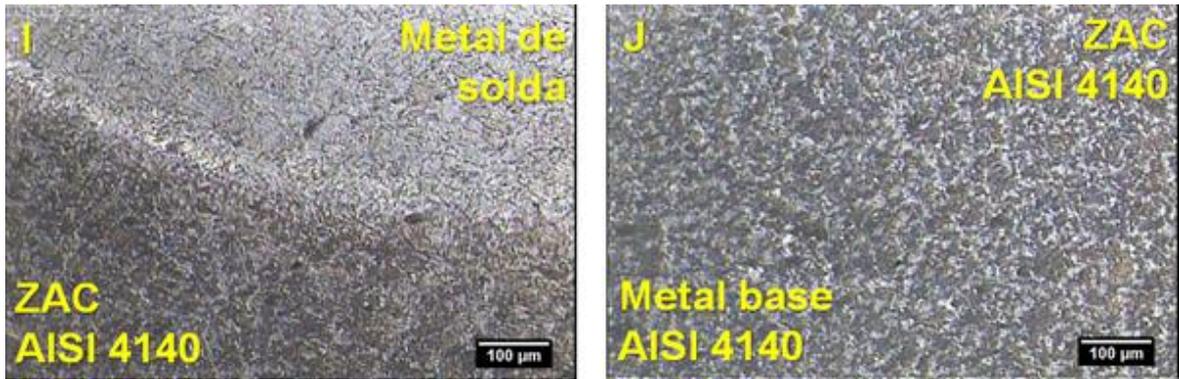


Figura 53: Micrografias com três camadas de solda, pré-aquecimento no aço AISI 4140 e pós-aquecimento no conjunto soldado. (J) Zona afetada pelo 1° passe de solda. (I) Zona afetada pelo 3° passe de solda.

As Figuras 54(K) e 54(L) apresentam uma microestrutura composta por ferrita (partes claras) e perlita (partes escuras). Ao analisar as Figuras 54(K) e 54(L) observa-se a fase de transição entre o metal base e a ZAC. Nota-se uma pequena redução no tamanho dos grãos na ZAC.

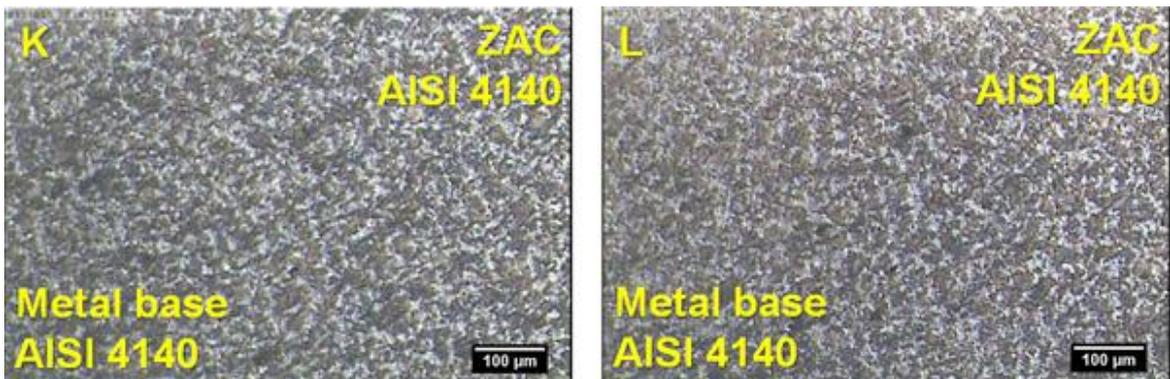


Figura 54: Micrografias com três camadas de solda, pré-aquecimento no aço AISI 4140 e pós-aquecimento no conjunto soldado. (K) Zona afetada pelo 2° passe de solda. (L) Zona afetada pelo 3° passe de solda.

4.4 DISCUSSÃO SOBRE OS RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS

A soldagem dos aços dissimilares (AISI 4140 e ASTM A36) foi realizada utilizando a técnica de soldagem com múltiplas camadas, e foi possível observar que o aço estrutural ASTM A36 apresentou boa soldabilidade e não houve grandes variações e fragilidade na ZAC do material após a soldagem. Logo, o aço AISI 4140 apresentou maior índice de temperabilidade, menor soldabilidade e maior fragilidade na ZAC devido ao carbono equivalente existente na estrutura cristalina do aço e também pelo fato da alta velocidade de resfriamento.

Nos experimentos em que utilizaram-se apenas uma camada de solda, notou-se um pequeno refino nas regiões da ZAC. Porém nos experimentos que foram

aplicados duas camadas de solda, a segunda camada penetrou na primeira e promoveu o refino da região dos grãos grosseiros da ZAC resultantes da primeira camada. Já nos testes em que foram aplicados três passes de solda, a terceira camada serviu para realizar o revestimento da solda e para reduzir a zona dura da camada anterior. Conseguiu-se com o aumento do número de passes diminuir o tamanho das zonas afetadas pelo calor e também, eliminar as zonas frágeis e as zonas duras geradas pela soldagem.

As peças que foram unidas sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento apresentaram um alto índice de fragilidade na ZAC do aço AISI 4140. Pelo fato do aço ser um material temperável, a zona fundida e as regiões da ZAC tornaram-se endurecidas e frágeis, pela alta velocidade de resfriamento e pela elevada quantidade de carbono equivalente na estrutura cristalina do aço. Já o aço estrutural ASTM A36 demonstrou na ZAC, regiões macias e com dureza menor, quando comparada com a ZAC do AISI 4140.

Os experimentos que foram realizados com pré-aquecimento no aço AISI 4140 e sem pós-aquecimento no conjunto soldado, demonstraram maior homogeneidade dos grãos nas regiões do aço, quando comparado com os experimentos sem cuidados especiais. As amostras soldadas com pré-aquecimento apresentaram valores de dureza mais baixo no aço AISI 4140.

Com o pré-aquecimento no aço AISI 4140 e pós-aquecimento no conjunto soldado houve um processo de revenimento e as regiões que apresentavam fragilidade na ZAC normalizaram, devido ao resfriamento lento no forno. Verificou-se uma redução significativa no nível de dureza da ZAC, conseqüentemente, o nível de tenacidade dessa região elevou-se e o material adquiriu maior capacidade de energia para absorver impactos, também houve um aumento na resistência da ZAC.

Comparando os resultados dos experimentos com pré-aquecimento e pós-aquecimento com os resultados dos testes anteriores, é possível afirmar que estes experimentos alcançaram muito sucesso por diminuir as ZAC dos aços, pois eliminaram-se as zonas críticas causadas pela soldagem, conseqüentemente, eliminaram-se as regiões duras e frágeis do conjunto soldado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os resultados obtidos nos experimentos e análises dos resultados, as seguintes conclusões podem ser obtidas:

- Foi realizada a soldagem de dois aços dissimilares (AISI 4140 e ASTM A36) sem tratamento térmico anterior e posterior;
- As peças soldadas com mais de um cordão de solda e sem tratamento posterior apresentaram menor ZAC;
- As peças soldadas com pós-aquecimento apresentaram uma ZAC muito pequena para todas as peças;
- As amostras sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento apresentaram um grau de dureza mais elevado no aço AISI 4140;
- Com o pré-aquecimento no aço AISI 4140 e pós-aquecimento no conjunto soldado conseguiram-se eliminar as zonas críticas causadas pela soldagem.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Através da análise dos resultados obtidos e tendo em vista a continuidade da pesquisa, apresentam-se as seguintes propostas de trabalhos futuros:

- 1) Empregar o mesmo procedimento dos experimentos deste trabalho, porém variar os parâmetros de soldagem e a composição do gás utilizado;
- 2) Estudar a tenacidade das juntas soldadas através da aplicação do teste de charpy para avaliar a resistência a tração e a fadiga;
- 3) Verificar o comportamento dos materiais em questão, através de novos experimentos, porém variando as espessuras;
- 4) Fazer novos testes de soldagem e variar o tipo e o diâmetro do arame consumível;
- 5) Manipular os parâmetros de processo, com objetivo de maximizar a produtividade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 87/2000**: Aços Carbono e Ligados para Construção Mecânica-Designação e Composição Química. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.
- AGUIAR, W. M. **Soldagem do aço ABNT 4140 sem Tratamento Térmico Posterior**. Dissertação de Mestrado. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2001.
- AGUIAR, W. M.; FARIAS, J. P.; SILVA, C. C. **Avaliação da Tenacidade da ZAC-GG em Aço ABNT 4140 Recuperado por Soldagem**. In: XX Encontro de Iniciação a Pesquisa, 2002.
- ANDRADE, W. S. **Estudo da técnica de dupla camada na soldagem de aço AISI 1045**. Trabalho de Conclusão de Curso. São Cristóvão: Universidade Federal de Sergipe, 2011.
- ARAÚJO, M. R. V. DE. **Caracterização microestrutural do metal de solda depositado por arco submerso em chapas de aço-carbono estrutural**. Dissertação de Mestrado. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista, 2006.
- AWS A5.18. **Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding**. Miami: American Welding Society, 2001.
- AWS D1.1/D1.1M. **Structural Welding Code – Steel**. Miami: American Welding Society, 2004.
- AZEVEDO, A. G. L. DE. **Aplicação da Técnica da Dupla Camada na Soldagem do Aço ABNT 1045**. Dissertação de mestrado. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2002.
- BARBOSA, R. P. **Tecnologia Mecânica: Metalurgia da Soldagem e Soldabilidade dos Materiais**. Material de Apoio. Coronel Fabriciano: Centro Universitário do Leste de Minas Gerais, 2007.
- BELGO ARCELOR. **Especificação do Aço de Qualidade Estrutural Naval**. Disponível em: <http://www.belgo.com.br/produtos/construcao_civil/produtos_planos/pdf/produtos_planos.pdf>. Acesso em: 07/06/12.
- BUENO, E. R. **Desenvolvimento do Procedimento de Soldagem do AISI 4140 sem Tratamento Térmico Posterior**. Dissertação de Mestrado. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos: Características gerais; Tratamentos térmicos; Principais tipos**. 4. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1979.
- ESAB. **Soldagem MIG/MAG**. Material de apoio. São Paulo: ESAB Soldagem e Corte, 2004.
- LIMA, F. B. **Microestrutura e Tenacidade de Aços Baixa Liga Tipo 41XX – Uma abordagem quantitativa**. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
- MACHADO, I. G. **Soldagem & Técnicas Conexas: Processos**. Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas. Centro de Tecnologia. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1996.

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

METALS HANDBOOK. **Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys**. 10. ed. Ohio: American Society for Metals, 1990. Vol. 1.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade dos Aços Transformáveis**. Material de apoio do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2004.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade de Algumas Ligas Metálicas**. Material de apoio do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

MOREIRA, A. F. **Influência da atmosfera protetora no cordão de solda obtido através dos processos de soldagem GMAW e FCAW**. Dissertação de Mestrado. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista, 2008.

SILVA JR, S. F.; CARLECH, L. P.; NETO, M. M. **Stress Measurements in a Structural Component Using Magnetic Barkhausen Noise Analysis**. Disponível em: <<http://www.ndt.net/article/ndtnet/2010/silva.pdf>>. Acesso em: 29/07/12.

SMITH, W. F. **Structure and Properties of Engineering Alloys Steels**. 2. ed. São Paulo: Mc Graw-Hill, 1993.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. DE. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 2004.