



Dissertação de Mestrado

Wilson Luiz de Almeida

**Análise do Comportamento Mecânico e dos Aspectos Macro e
Microestruturais do Ferro Fundido Nodular Submetido a Ciclos
Térmicos de Soldagem**

Maio de 2014



Wilson Luiz de Almeida

Análise do Comportamento Mecânico e dos Aspectos Macro e Microestruturais do Ferro Fundido Nodular Submetido a Ciclos Térmicos de Soldagem

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET/MG, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Ciência e Desenvolvimento de Materiais

Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização de Materiais

Orientador: Profa. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Coorientador: Prof. Dr. Ivan José de Santana

Belo Horizonte, maio de 2014.

Análise do Comportamento Mecânico e dos Aspectos Macro e Microestruturais do Ferro Fundido Nodular Submetido a Ciclos Térmicos de Soldagem

Dissertação submetida à Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Materiais.

Profa. Dra. Elaine Carballo S. Corrêa- orientador
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Ivan José de Santana – co-orientador
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Profa. Dra. Maria Celeste Monteiro de Souza Costa
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Msc. Joel Romano Brandão
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Maio de 2014

AGRADECIMENTOS

Expresso meus sinceros agradecimentos à Prof^a. Dr^a. Elaine Carballo S. Corrêa, orientadora, por ter acreditado neste trabalho, pelo incentivo, estima, consideração, apoio e suporte técnico sem os quais não teria sido possível a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Ivan José de Santana, co-orientador, pela colaboração na execução da soldagem dos corpos de prova, inúmeras sugestões no decorrer da elaboração do trabalho e suporte técnico sem os quais não teria sido possível a realização deste trabalho.

À Fundação Altivo, na pessoa do Prof. Dr. Guilherme Marconi Silva, pelo fornecimento de material.

À EUTECTIC do BRASIL LTDA., através do Eng. Walisson Marcos Valadares, pela doação dos eletrodos utilizados neste trabalho.

À ESAB, através do Eng. Rodrigo Sanches de Oliveira, pela doação de eletrodos.

Ao aluno de graduação Marcelo Fonseca Pinto pela valiosa ajuda na preparação dos corpos de prova e experimentos.

Às mestrandas Aline Silva Magalhães e Suzany Cristina Soares Martins, que muito contribuíram na obtenção dos resultados dos ensaios.

Aos Professores do Departamento de Engenharia de Materiais Rogério Felício dos Santos e Joel Romano Brandão pela auxílio na preparação dos corpos de prova.

Ao Técnico do Departamento de Engenharia de Materiais Sr. José Jésus Caetano, que muito gentilmente cortou o material bruto para a obtenção dos corpos de prova.

RESUMO

Os ferros fundidos fazem parte de um grupo de materiais, dentre diversas ligas metálicas, de grande importância industrial, não só devido às suas próprias características, mas também ao fato de que através de modificações em sua composição química e na realização de tratamentos térmicos, especialmente no caso do ferro fundido nodular, podem ser utilizados em aplicações que antes eram consideradas exclusivas dos aços. Comparando a conformação mecânica e a soldabilidade dos ferros fundidos em relação aos dos aços, entretanto, os primeiros são mais difíceis de serem trabalhados, mas com o entendimento de sua microestrutura e de suas características, podem ser adotados alguns procedimentos com o objetivo de eliminar e ou contornar estas dificuldades. Dentro desse contexto, no presente trabalho foram avaliadas as diferentes microestruturas e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas e a soldabilidade do ferro fundido nodular quando submetido ao processo de soldagem SMAW com e sem a aplicação de pré-aquecimento. Após a realização de testes de soldagem, foram obtidas imagens da microestrutura e da macroestrutura dos cordões depositados. Foram obtidos os perfis de dureza Vickers das zonas fundidas e das zonas termicamente afetadas. Foi possível avaliar a influência de diferentes tipos de eletrodos revestidos e da utilização ou não de pré-aquecimento nas propriedades mecânicas e características microestruturais das zonas fundidas e da ZTA dos cordões obtidos.

Palavras-chaves: ferro fundido nodular, soldagem, estrutura, dureza.

ABSTRACT

Among several metallic alloys, the cast irons are part of a group of materials of great importance to the industry, not only because of their own characteristics, but also related to the fact that by changing the chemical composition and performing appropriate heat treatments, especially in the case of the ductile cast iron, these materials can be used in applications usually exclusive of the steel. Comparing forming and welding operations of cast irons and steels, in fact the former are more difficult to be worked out. However, understanding its microstructure and characteristics, some procedures in order to eliminate and/or diminish these difficulties can be developed. In this work the microstructure and, consequently, the mechanical properties and the weldability of a ductile cast iron subjected to shielded metal arc welding SMAW process, with and without preheating, was evaluated. After welding, the macrostructure and the microstructure were analyzed. Vickers hardness profiles were obtained in the cast zone and in the heat affected zone. The influence of the characteristics of the electrode and the preheating in the microstructure and the mechanical properties was observed.

Keywords: ductile cast iron, welding, structure, hardness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Potencial grafitizante de elementos de liga diversos.....	21
Figura 3.2 – Morfologia da grafita nos ferros fundidos.....	23
Figura 3.3 – Formação de grafita em veios e em nódulos no ferro fundido.....	24
Figura 3.3 – Representação do diagrama Fe-Fe ₃ C metaestável com a evolução da microestrutura dos ferros fundidos brancos eutético (4,3%C) e exemplos de hipoeutético (3%C) e hipereutético (5,4%C).....	26
Figura 3.5 – Exemplos de micrografias de ferros fundidos brancos.....	26
Figura 3.6 – Exemplos de micrografias de ferros fundidos cinzentos.....	27
Figura 3.7 – Tipos de grafita em veios nos ferros fundidos cinzentos, segundo a Norma ISSO 945/1975.....	28
Figura 3.8 – Exemplos de micrografias de ferros fundidos cinzentos contendo as cinco formas de grafita em veios.....	29
Figura 3.9 – Exemplos de micrografias de ferros fundidos maleáveis.....	31
Figura 3.10 – Exemplo de micrografia de um ferro fundido vermicular.....	32
Figura 3.11 – Exemplos de micrografias de ferros fundidos nodulares.....	34
Figura 3.12 – Tipos de grafita em nódulos nos ferros fundidos nodulares, segundo a Norma ASTM A 247-67.....	34
Figura 3.13 – Exemplos de micrografias de um ferro fundido nodular austemperado exibindo na matriz ferrita acicular α , martensita M e austenita γ	35
Figura 3.14 – Representação das variáveis de influência nas propriedades mecânicas dos ferros fundidos nodulares com matriz de ferrita e perlita.....	36
Figura 3.15 – Limite de resistência, alongamento % e dureza de diferentes classes de ferros fundidos nodulares.....	36
Figura 3.16 – Efeito da quantidade de perlita e da temperatura na tenacidade do ferro fundido nodular.....	37
Figura 3.17 – Evolução dos processos de soldagem ao longo do tempo.....	39
Figura 3.18 – Variação da energia potencial de um sistema composto por dois átomos em função da separação entre eles.....	40

Figura 3.19 – Obtenção de uma solda por aproximação das superfícies a unir.....	41
Figura 3.20 – Corte transversal de uma superfície polida.....	42
Figura 3.21 – Soldagem por pressão.....	42
Figura 3.22 – Soldagem por fusão.....	42
Figura 3.23 – Zonas e regiões no material soldado.....	43
Figura 3.24 – Representação do processo de soldagem ao arco elétrico com eletrodo revestido.....	44
Figura 3.25 – Representação esquemática das zonas de temperaturas em soldagem típica do ferro fundido.....	49
Figura 4.1 – Fluxograma das atividades experimentais desenvolvidas no trabalho.....	55
Figura 4.2 – Representação esquemática do corpo de prova de ferro fundido nodular utilizado no processo de soldagem.....	57
Figura 4.3 – Imagem, apresentada como exemplo, de um dos corpos de prova de ferro fundido nodular utilizados no trabalho.....	57
Figura 4.4 – Imagem de um dos corpos de prova preparados para a deposição de cordões por soldagem.....	60
Figura 4.5 – Imagens, como exemplos, de corpos de prova após a deposição de cordão em um e dois passes.....	61
Figura 4.6 – Imagens, como exemplo, da etapa inicial de preparação de amostras para a caracterização do ferro fundido nodular após a deposição de cordão de solda.....	63
Figura 4.7 – Representações esquemáticas do procedimento e localização das impressões para a obtenção da distribuição da microdureza no ferro fundido nodular após a deposição dos cordões de solda.....	66
Figura 5.1 – Fotomicrografias do ferro fundido nodular empregado no trabalho no estado como recebido.....	67
Figura 5.2 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi sem pré-aquecimento – corpo de prova soldado em um passe.....	68
Figura 5.3 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi com pré-aquecimento de 100°C – corpo de prova soldado em um passe.....	69
Figura 5.4 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi	

com pré-aquecimento de 200°C – corpo de prova soldado em um passe.....	69
Figura 5.5 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi com pré-aquecimento de 300°C – corpo de prova soldado em um passe.....	70
Figura 5.6 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi com pré-aquecimento de 400°C – corpo de prova soldado em um passe.....	70
Figura 5.7 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi sem pré-aquecimento – corpo de prova soldado em dois passes.....	71
Figura 5.8 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi com pré-aquecimento de 100°C – corpo de prova soldado em dois passes.	71
Figura 5.9 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi com pré-aquecimento de 200°C – corpo de prova soldado em dois passes.	72
Figura 5.10 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi com pré-aquecimento de 300°C – corpo de prova soldado em dois passes.....	72
Figura 5.11 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi com pré-aquecimento de 400°C – corpo de prova soldado em dois passes.....	73
Figura 5.12 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo Ni sem pré-aquecimento – corpo de prova soldado em um passe.....	74
Figura 5.13 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 100°C – corpo de prova soldado em um passe.....	74
Figura 5.14 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 200°C – corpo de prova soldado em um passe.....	75
Figura 5.15 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 300°C – corpo de prova soldado em um passe.....	75
Figura 5.16 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 400°C – corpo de prova soldado em um passe.....	76
Figura 5.17 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo Ni sem pré-aquecimento – corpo de prova soldado em dois passes.....	76
Figura 5.18 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 100°C – corpo de prova soldado em dois passes...	77
Figura 5.19 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 200°C – corpo de prova soldado em dois passes...	77

Figura 5.20 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 300°C – corpo de prova soldado em dois passes...	78
Figura 5.21 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 400°C – corpo de prova soldado em dois passes...	78
Figura 5.22 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi sem pré-aquecimento – soldagem em um passe.....	80
Figura 5.24 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi com pré-aquecimento de 200°C – soldagem em um passe.....	80
Figura 5.25 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi com pré-aquecimento de 300°C – soldagem em um passe.....	81
Figura 5.26 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi com pré-aquecimento de 400°C – soldagem em um passe.....	81
Figura 5.27 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi sem pré-aquecimento – soldagem em dois passes.....	82
Figura 5.28 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi com pré-aquecimento de 100°C – soldagem em dois passes.....	82
Figura 5.29 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi com pré-aquecimento de 200°C – soldagem em dois passes.....	83
Figura 5.30 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi com pré-aquecimento de 300°C – soldagem em dois passes.....	83
Figura 5.31 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi com pré-aquecimento de 400°C – soldagem em dois passes.....	84
Figura 5.32 – Valores de dureza mais elevados apresentados após soldagem em um passe com eletrodo FeNi acompanhados da distância na	

qual aparecem.....	86
Figura 5.33 – Valores de dureza mais elevados apresentados após soldagem em dois passes com eletrodo FeNi acompanhados da distância na qual aparecem.....	86
Figura 5.34 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo Ni sem pré-aquecimento – – soldagem em um passe.....	87
Figura 5.35 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 100°C – soldagem em um passe.....	88
Figura 5.36 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 200°C – soldagem em um passe.....	88
Figura 5.37 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 300°C – soldagem em um passe.....	89
Figura 5.38 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 400°C – soldagem em um passe.....	89
Figura 5.39 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo Ni sem pré-aquecimento – – soldagem em dois passes.....	90
Figura 5.40 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 100°C – soldagem em dois passes.....	90
Figura 5.41 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 200°C – soldagem em dois passes.....	91
Figura 5.42 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 300°C – soldagem em dois passes.....	91
Figura 5.43 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 400°C – soldagem em	

dois passes.....	92
Figura 5.44 – Valores de dureza mais elevados apresentados após soldagem em um passe com eletrodo Ni acompanhados da distância na qual aparecem.....	93
Figura 5.45 – Valores de dureza mais elevados apresentados após soldagem em dois passes com eletrodo Ni acompanhados da distância na qual aparecem.....	94
Figura 5.46 – Micrografias da zona fundida do ferro fundido nodular soldado com eletrodo FeNi – corpo de prova soldado em um passe.....	95
Figura 5.47 – Micrografias do ferro fundido nodular soldado com eletrodo FeNi sem pré-aquecimento – corpo de prova soldado em um passe.....	97
Figura 5.48 – Micrografias do ferro fundido nodular soldado com eletrodo FeNi com pré-aquecimento de 200°C – corpo de prova soldado em um passe.....	98
Figura 5.49 – Micrografias do ferro fundido nodular soldado com eletrodo FeNi com pré-aquecimento de 400°C – corpo de prova soldado em um passe.....	99
Figura 5.50 – Micrografias da zona fundida do ferro fundido nodular soldado com eletrodo FeNi – corpo de prova soldado em dois passes.....	100
Figura 5.51 – Micrografias do ferro fundido nodular soldado com eletrodo FeNi sem pré-aquecimento – corpo de prova soldado em dois passes.....	102
Figura 5.52 – Micrografias do ferro fundido nodular soldado com eletrodo FeNi com pré-aquecimento de 200°C – corpo de prova soldado em dois passes.....	103
Figura 5.53 – Micrografias do ferro fundido nodular soldado com eletrodo FeNi com pré-aquecimento de 400°C – corpo de prova soldado em dois passes.....	104
Figura 5.54 – Micrografias da zona fundida do ferro fundido nodular soldado com eletrodo Ni – corpo de prova soldado em um passe.....	105
Figura 5.55 – Micrografias do ferro fundido nodular soldado com eletrodo Ni sem pré-aquecimento – corpo de prova soldado em um passe.....	106
Figura 5.56 – Micrografias do ferro fundido nodular soldado com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 200°C – corpo de prova soldado em um passe.....	107
Figura 5.57 – Micrografias do ferro fundido nodular soldado com eletrodo Ni	

com pré-aquecimento de 400°C – corpo de prova soldado em um passe.....	108
Figura 5.58 – Micrografias da zona fundida do ferro fundido nodular soldado com eletrodo Ni – corpo de prova soldado em dois passes.....	109
Figura 5.59 – Micrografias do ferro fundido nodular soldado com eletrodo Ni sem pré-aquecimento – corpo de prova soldado em dois passes.....	110
Figura 5.60 – Micrografias do ferro fundido nodular soldado com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 200°C – corpo de prova soldado em dois passes...	111
Figura 5.61 – Micrografias do ferro fundido nodular soldado com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 400°C – corpo de prova soldado em dois passes...	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Composição química (% em peso) fornecida pelo fabricante do ferro fundido nodular utilizado no trabalho.....	58
Tabela 4.2 – Espessura dos corpos de prova de ferro fundido nodular confeccionados para o trabalho – valores individuais e médio.....	58
Tabela 4.3 – Parâmetros de pré-aquecimento utilizados no trabalho.....	59
Tabela 4.4 – Valores de corrente médios acompanhados de desvio padrão observados na soldagem em um passe do ferro fundido nodular com eletrodo FeNi.....	61
Tabela 4.5 – Valores de corrente médios acompanhados de desvio padrão observados na soldagem em dois passes do ferro fundido nodular com eletrodo FeNi.....	62
Tabela 4.6 – Valores de corrente médios acompanhados de desvio padrão observados na soldagem em um passe do ferro fundido nodular com eletrodo Ni.....	62
Tabela 4.7 – Valores de corrente médios acompanhados de desvio padrão observados na soldagem em dois passes do ferro fundido nodular com eletrodo Ni.....	62
Tabela 4.8 – Reagentes químicos utilizados na caracterização macrográfica e micrográfica das amostras.....	64
Tabela 5.1 – Valores de dureza médios de duas amostras no estado inicial..	68
Tabela 5.2 – Valores de dureza mais elevados apresentados após soldagem em um passe com eletrodo FeNi acompanhados da distância na qual aparecem.....	85
Tabela 5.3 – Valores de dureza mais elevados apresentados após soldagem em dois passes com eletrodo FeNi acompanhados da distância na qual aparecem.....	85
Tabela 5.4 – Valores de dureza mais elevados apresentados após soldagem em um passe com eletrodo Ni acompanhados da distância na qual aparecem.....	92
Tabela 5.5 – Valores de dureza mais elevados apresentados após soldagem em dois passes com eletrodo Ni acompanhados da distância na	

qual aparecem.....

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	18
2. OBJETIVOS.....	19
2.1. Objetivo Geral.....	19
2.2. Objetivos Específicos.....	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
3.1. Ferros Fundidos.....	20
3.1.1. Características gerais dos ferros fundidos.....	20
3.1.2. Principais tipos de ferros fundidos.....	24
3.1.2.1. ferros fundidos brancos.....	27
3.1.2.2. ferros fundidos cinzentos.....	25
3.1.2.3. ferros fundidos maleáveis.....	30
3.1.2.4. ferros fundidos vermiculares.....	32
3.1.3. Ferros fundidos nodulares.....	32
3.2. Processo de Soldagem.....	37
3.2.1. Aspectos gerais dos processos de soldagem.....	37
3.2.2. Formação de uma junta soldada.....	40
3.2.3. Soldagem a arco com eletrodo revestido SMAW.....	43
3.2.4. Soldagem dos ferros fundidos.....	47
4. METODOLOGIA.....	54
4.1. Descrição Geral do Trabalho Realizado.....	54
4.2. Material.....	55
4.3. Corpos de Prova.....	56
4.3. Pré-Aquecimento dos Corpos de Prova.....	59
4.4. Processo de Soldagem.....	59
4.5. Caracterização Macro e Microestrutural do Material Soldado.....	63
4.6. Ensaios de Dureza.....	65
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	67
5.1. Caracterização do Material no Estado Inicial.....	67
5.2. Macrografia dos Corpos de Prova Soldados.....	68
5.3. Distribuição de Microdureza nos Corpos de Prova Soldados.....	79
5.4. Microestrutura dos Corpos de Prova Soldados.....	95
6. CONCLUSÕES.....	113

7. REFERÊNCIAS.....	114
---------------------	-----

1. INTRODUÇÃO

Os ferros fundidos fazem parte de um grupo de materiais metálicos de grande relevância industrial, uma vez que mediante alterações na composição química e realização de eventuais tratamentos térmicos, uma extensa gama de propriedades pode ser obtida, ampliando assim suas possibilidades em termos de aplicações.

Apesar da importância, entretanto, uma das principais limitações das ligas ferrosas mencionadas está associada às operações de fabricação das peças e componentes. Com exceção dos processos de usinagem, não aplicáveis a todos os tipos de ferros fundidos, as operações de fabricação usualmente se concentram nas técnicas de fundição.

Por outro lado, a soldagem representa um dos mais relevantes processos de união de peças, podendo ser definida, de maneira geral, como uma operação ou grupo de operações que visam obter a coalescência localizada produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a aplicação de pressão e utilização de metal de adição.

Comparando a soldagem dos ferros fundidos com a dos aços, ambos materiais metálicos ferrosos, os primeiros são considerados mais complexos de serem processados, fenômeno associado ao elevado teor de carbono em sua composição.

Neste trabalho foram avaliadas as diferentes microestruturas e, conseqüentemente, a dureza e a soldabilidade especificamente do ferro fundido nodular quando submetido ao processo de soldagem SMAW com e sem a aplicação de pré-aquecimento e utilizando diferentes tipos de eletrodos revestidos. Após a caracterização do material e a execução de testes de soldagem, foram obtidas imagens da micro e da macroestrutura dos cordões depositados, por meio de microscopia óptica. Foram determinados os perfis de dureza, das zonas fundidas e da ZTA, por meio de microdureza Vickers. Foi possível avaliar a influência de diferentes tipos de eletrodos revestidos e da utilização ou não de pré-aquecimento nas propriedades mecânicas e características microestruturais das zonas fundidas e da ZTA dos cordões obtidos.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho foi a avaliação dos aspectos macro e microestruturais e da dureza de um ferro fundido nodular de matriz ferrítica perlítica submetido ao processo de soldagem SMAW (Shielded Metal Arc Welding – soldagem ao arco com eletrodo revestido).

2.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são listados a seguir.

- Analisar os efeitos das características do eletrodo revestido na distribuição de microdureza e na macro e microestrutura do material após a deposição de cordão de solda.
- Verificar a influência do pré-aquecimento na distribuição de microdureza e na macro e microestrutura do material após a deposição de cordão de solda.
- Observar os efeitos do emprego de um ou dois passes de soldagem na distribuição de microdureza e na macro e microestrutura do material após a deposição de cordão de solda.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Ferros Fundidos

3.1.1. Características gerais dos ferros fundidos

Os ferros fundidos são ligas Fe-C nas quais o teor de carbono se situa entre 2,11% e 6,67%, contendo ainda uma apreciável quantidade de silício. Dessa forma, são usualmente considerados como ligas ternárias Fe-C-Si, pois esse último elemento muitas vezes está presente em teores superiores ao do próprio carbono (CHIAVERINI, 2005).

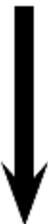
A importância dos ferros fundidos está associada ao fato de que, a partir da introdução de elementos de liga, da realização de tratamentos térmicos e, posteriormente, do desenvolvimento do ferro fundido nodular, seu emprego tem sido possível em situações que originalmente eram exclusivas dos aços (CHIAVERINI, 2005). Além disso, características como baixo ponto de fusão, alta fluidez, menor contração durante o processo de solidificação e ainda custo relativamente reduzido são fatores que levam à preferência desses materiais sobre os aços fundidos em muitas situações (DE PARIS, 2003).

Um dos aspectos mais relevantes dos ferros fundidos é que o carbono pode estar presente de maneiras distintas: dissolvido, ou seja, em solução sólida nas fases diversas; combinado ao ferro, na forma de cementita (Fe_3C); e isolado, como grafita (G), com estrutura cristalina hexagonal compacta (HC). A ocorrência de cada uma das formas mencionadas leva a propriedades específicas e se dá essencialmente devido a dois fatores: a composição química e a velocidade de resfriamento do material (COLPAERT, 2008; CHIAVERINI, 2005).

Em termos de composição química, a formação de grafita ou de cementita depende do efeito da presença e da quantidade dos elementos de liga na estabilidade dessa última fase, sendo que os principais, além do carbono, são: silício, manganês, enxofre e fósforo. O carbono irá influenciar basicamente na quantidade de grafita a

ser formada (CHIAVERINI, 2005). O silício reduz a estabilidade da cementita, aumentando a diferença entre as temperaturas eutéticas estável e metaestável, favorecendo assim sua decomposição em grafita e ferrita, sendo denominado um elemento grafitizante (GUESSER, 2009; COLPAERT, 2008; COUTINHO, 1992). Por outro lado, a presença de manganês dificulta a decomposição da cementita em grafita, podendo até mesmo, em níveis de concentração elevados, anular os efeitos da presença de silício. Já o enxofre e o fósforo, apesar de não exibirem efeitos acentuados (CHIAVERINI, 2005), podem atuar no sentido de modificar a morfologia da grafita e, de acordo com a quantidade, aparecer como elemento grafitizante ou estabilizador da cementita (COLPAERT, 2008). Na figura 3.1 pode ser observado o efeito geral da presença de alguns elementos de liga no ferro fundido em termos de potencial grafitizante ou maior tendência à formação de carbonetos (COLPAERT, 2008).

Figura 3.1 – Potencial grafitizante de elementos de liga diversos.

Elementos com potencial grafitizante positivo	Potencial grafitizante aumenta 
Carbono Estanho Fósforo Silício Alumínio Cobre Níquel	
Elementos com potencial grafitizante negativo (favorecem a formação de carbonetos)	Menor tendência a carbonetos 
Manganês Cromo Molibdênio Vanádio	

Fonte: COLPAERT, 2008.

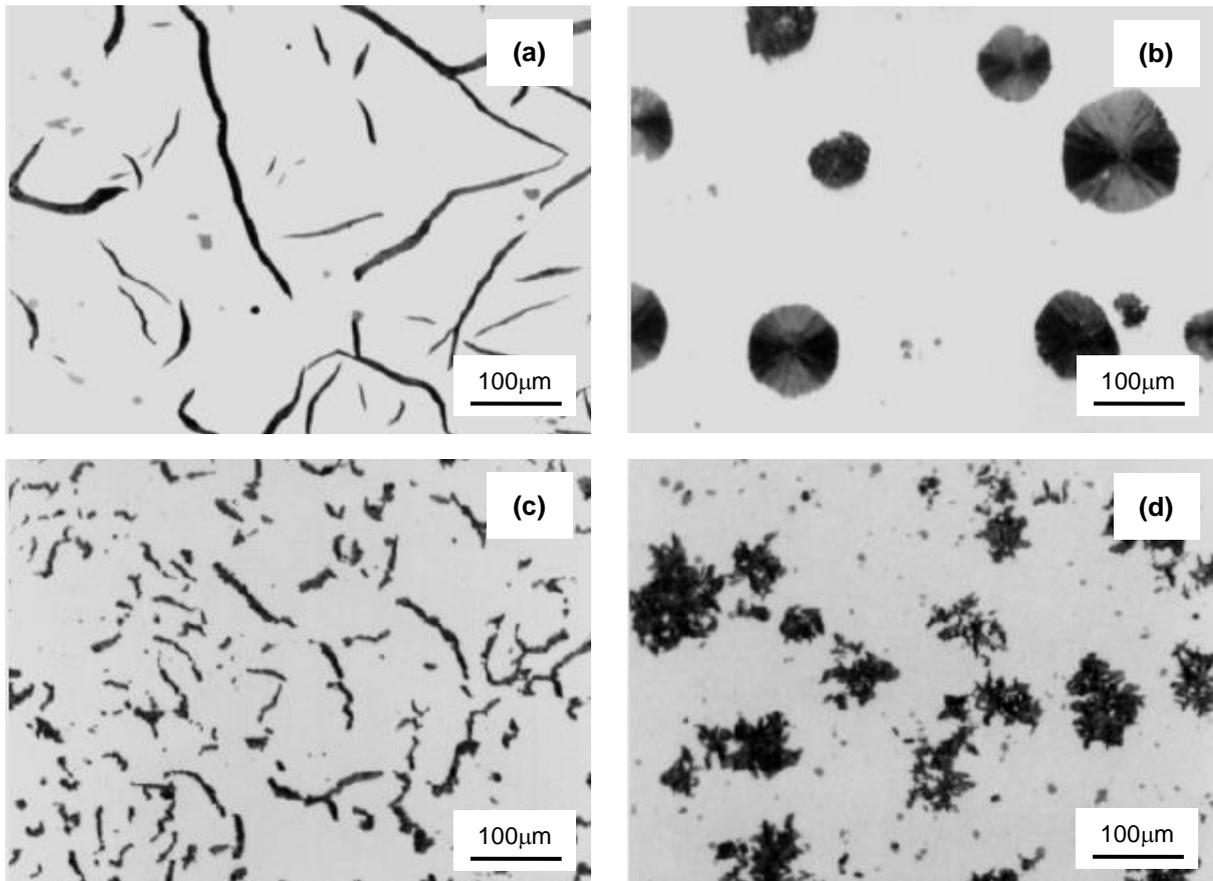
A importância da velocidade de resfriamento se dá devido ao fato de que depende da mesma o tempo para decomposição da cementita. Neste caso, valores relativamente altos implicam em tempo insuficiente para a formação de grafita

(COUTINHO, 1992). A velocidade de resfriamento é controlada, em geral, pelas dimensões da peça a ser fabricada e pelas características do material do molde de fundição (COLPAERT, 2008).

Nos ferros fundidos com presença de grafita, a microestrutura aparece como uma matriz similar aos aços, com constituintes como ferrita e perlita, dentre outros, e porções de grafita. Em termos de propriedades, a grafita possui resistência mecânica considerada baixa, de modo que sua presença pode ser entendida como uma descontinuidade da matriz, exercendo um efeito de concentração de tensões (GUESSER, 2009). A forma da grafita também afeta de maneira acentuada as propriedades mecânicas da liga, cuja influência pode ser apontada como positiva ou negativa, de acordo com a demanda de utilização do componente fabricado em ferro fundido. Dessa forma, as características finais desses ferros fundidos irão depender dos constituintes presentes na matriz e da morfologia da grafita, além da proporção de cada um.

Na Figura 3.2 são apresentadas imagens de ferros fundidos (exemplos de amostras preparadas metalograficamente, porém sem ataque com reagente químico, não revelando a matriz da liga) com a presença de grafita em suas diversas formas: em veios, em nódulos, compacta ou vermicular e em agregados (ASM HANDBOOK, 2004). A morfologia da grafita, considerando as formas em veios (ou lamelar) e em nódulos, será determinada de acordo com o plano de crescimento desta fase hexagonal, que pode ser o basal ou o prismático, conforme a Figura 3.3 (GUESSER, 2009). O plano no qual o crescimento da estrutura ocorre é aquele em que a energia interfacial do sólido com o líquido na solidificação é menor, resultando em uma redução na energia livre do sistema. No caso de ligas contendo apenas ferro, carbono e silício, o plano preferencial de crescimento é o basal, resultando em grafita nodular. No entanto, na presença de elementos como o enxofre e o oxigênio, a energia interfacial do plano prismático é reduzida, levando à formação, dessa forma, de grafita em veios. Por outro lado, a adição de elementos como o magnésio e o cério, que possuem ação desoxidante e dessulfurante, altera a energia interfacial sólido/líquido da estrutura, levando à ocorrência de crescimento segundo o plano basal e, portanto, à formação dos nódulos de grafita.

Figura 3.2 – Morfologia da grafita nos ferros fundidos.



(a) Grafita em veios, (b) Grafita em nódulos, (c) Grafita compacta ou vermicular e (d) Grafita em agregados.

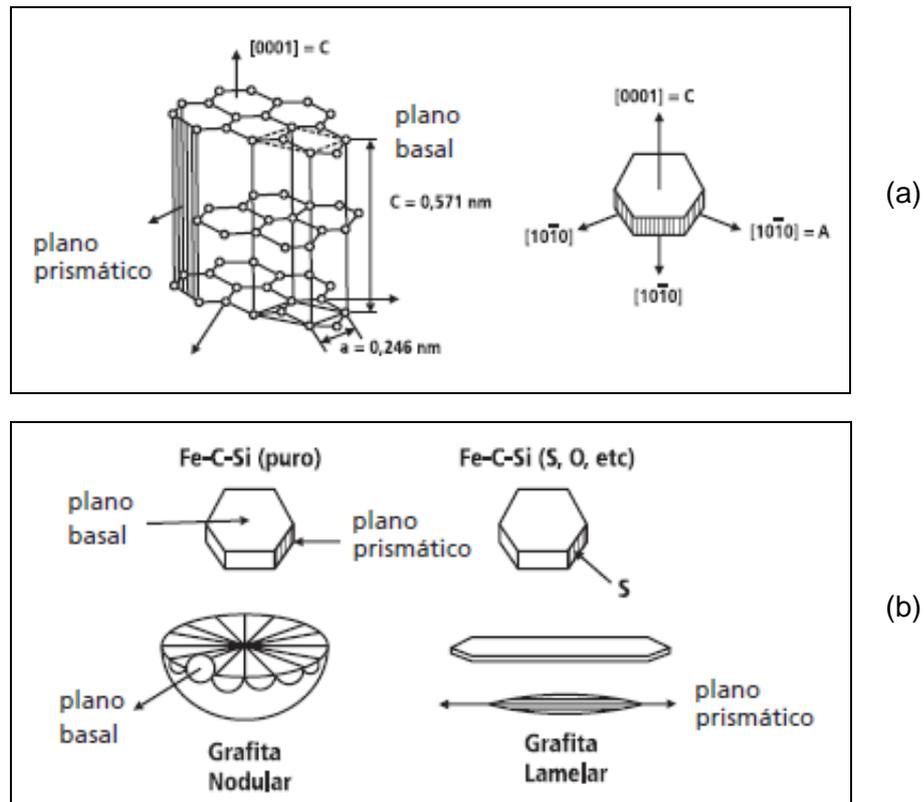
Fonte: ASM HANDBOOK, 2004.

Além da ocorrência e da morfologia da grafita, a presença de elementos de liga influencia as curvas e os pontos do diagrama de equilíbrio. Dessa forma, foi introduzido o conceito de carbono equivalente (CE), que combinaria os efeitos essencialmente do carbono e do silício, considerando ainda, de acordo com as bibliografias, outros elementos, como o manganês e o enxofre. Nas equações 1 e 2 podem ser verificadas expressões desenvolvidas para a determinação de CE (ASM HANDBOOK, 2004; GUESSER, 2009). Em termos práticos, no diagrama de fases, o teor de carbono é substituído pelo valor do carbono equivalente.

$$CE = \%C + 0,3 (\%Si) + 0,33(\%P) - 0,027(\%Mn) + 0,4(\%S) \quad \text{eq. 1}$$

$$CE = \%C + (\%Si + \%P)/3 \quad \text{eq. 2}$$

Figura 3.3 – Formação de grafita em veios e em nódulos no ferro fundido.



(a) Estrutura hexagonal evidenciando os planos prismático e basal e (b) Crescimento nos planos mencionados.

Fonte: GUESSER, 2009.

3.1.2. Principais tipos de ferros fundidos

Historicamente, a primeira classificação dos ferros fundidos foi baseada no aspecto macroscópico de sua fratura. Neste caso, dois tipos de ligas foram inicialmente reconhecidas: ferro fundido branco e ferro fundido cinzento. A primeira liga seria caracterizada pela ocorrência de uma superfície de fratura branca, fenômeno devido ao fato de que a fratura mencionada se daria ao longo das placas de cementita, resultado da solidificação metaestável (líquido \rightarrow austenita + cementita). A segunda liga, por outro lado, seria definida pela ocorrência de uma superfície de fratura de cor cinzenta, fenômeno associado à ruptura do metal ao longo das lamelas de grafita, resultado da solidificação estável do material (líquido \rightarrow austenita + grafita).

Com o desenvolvimento das técnicas metalográficas e o aprofundamento no conhecimento dos ferros fundidos, outras classificações baseadas nos aspectos microestruturais dessas ligas se tornaram possíveis. Neste caso, seriam consideradas a forma da grafita, quando fosse o caso de formação da mesma, e as características microestruturais da matriz do ferro fundido.

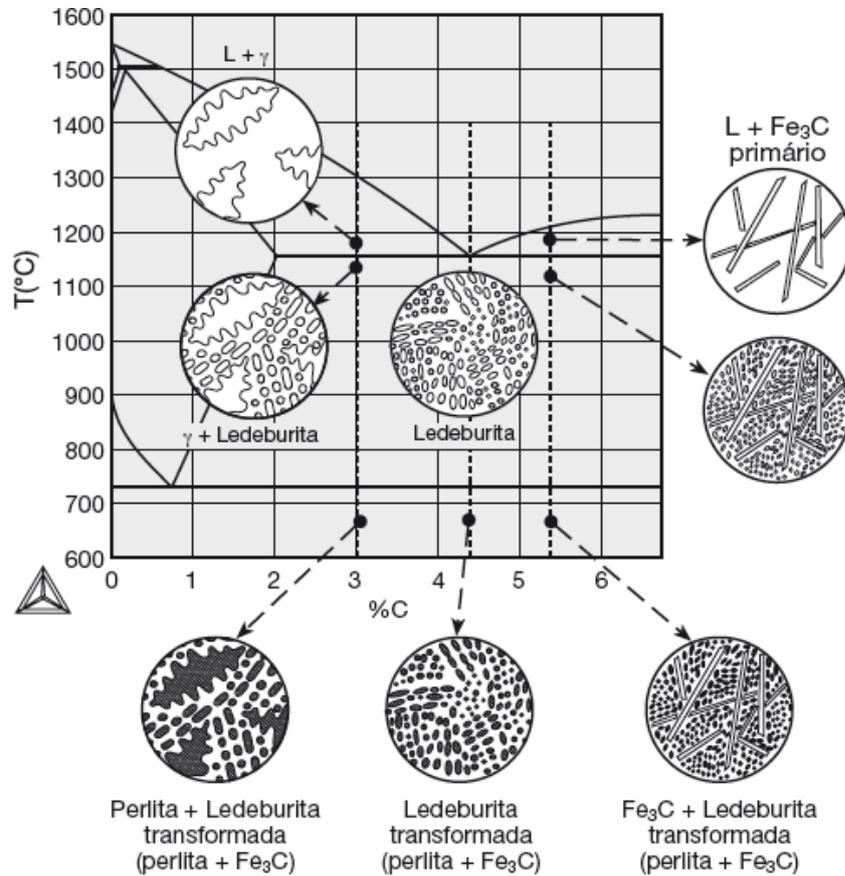
Atualmente, a classificação dos ferros fundidos em diferentes grupos é conduzida, em geral, de acordo com a forma da grafita, com o aspecto de sua fratura ou com alguma propriedade mecânica (GUESSER, 2009). Dentro deste contexto, as principais famílias de ferros fundidos são: ferros fundidos brancos, ferros fundidos cinzentos, ferros fundidos maleáveis, ferros fundidos vermiculares e ferros fundidos nodulares.

3.1.2.1. ferros fundidos brancos

Os ferros fundidos brancos exibem, de maneira geral, teores de silício inferiores a 1% e taxas de resfriamento relativamente altas (CALLISTER, 2008), podendo apresentar ainda o cromo como elemento de liga (DE PARIS, 2003). Para sua produção industrial, em geral, emprega-se o chamado sistema de coquilhamento, consistindo em verter a liga em moldes metálicos fazendo com que a mesma se resfrie em condições tais que praticamente todo o processo de grafitização é eliminado (CHIAVERINI, 2005). Portanto, essas ligas não apresentam o carbono livre na forma de grafita, mas sim na sua forma combinada, como cementita.

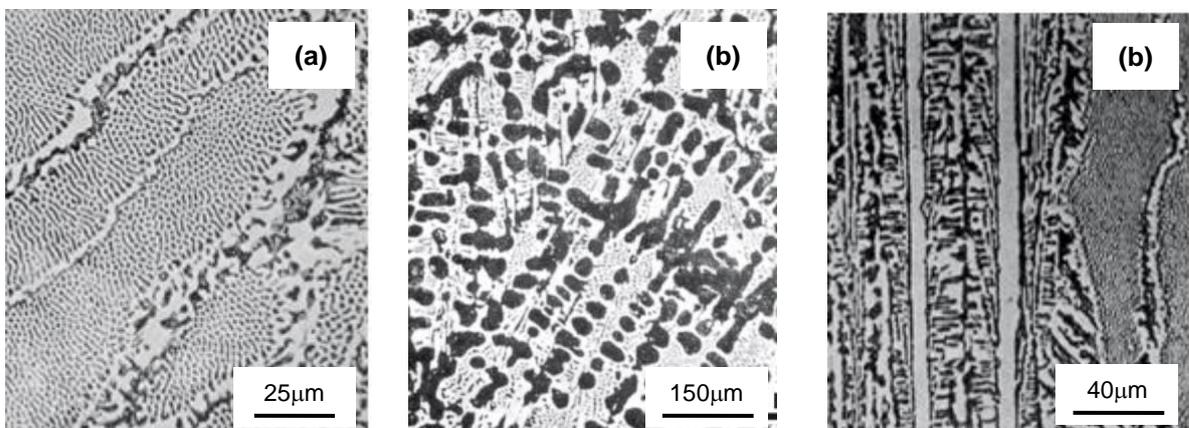
De acordo com a composição química, os ferros fundidos brancos são classificados em três grandes grupos: ligas eutéticas, ligas hipoeutéticas e ligas hipereutéticas. Na Figura 3.4 é mostrada uma representação, no diagrama Fe-Fe₃C metaestável, da evolução microestrutural geral das três ligas mencionadas com o resfriamento (COLPAERT, 2008). Nota-se que, para o caso do ferro fundido branco, o microconstituente típico à temperatura ambiente é a ledeburita. Já para os ferros fundidos brancos hipoeutéticos e hipereutéticos, a microestrutura seria caracterizada pela presença de ledeburita e perlita, e ledeburita e cementita, respectivamente. Exemplos de micrografias de ferros fundidos eutético, hipoeutético e hipereutético são exibidos na Figura 3.5 (COLPAERT, 2008).

Figura 3.3 – Representação do diagrama Fe-Fe₃C metaestável com a evolução da microestrutura dos ferros fundidos brancos eutético (4,3%C) e exemplos de hipoeutético (3%C) e hipereutético (5,4%C).



Fonte: COLPAERT, 2008.

Figura 3.5 – Exemplos de micrografias de ferros fundidos brancos.



(a) Eutético, (b) Hipoeutético e (c) Hipereutético.

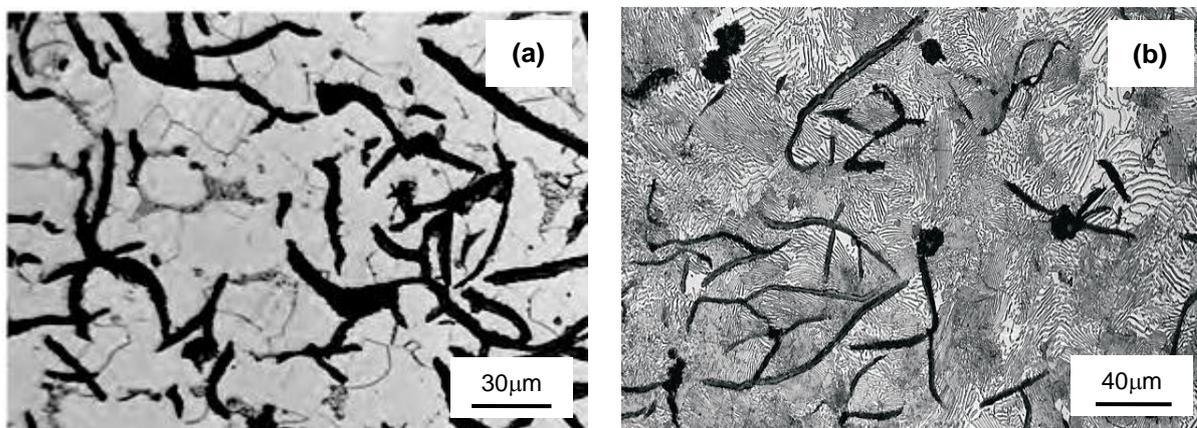
Fonte: COLPAERT, 2008.

As características principais dos ferros fundidos brancos, devido à alta quantidade de cementita, são: elevada dureza e resistência ao desgaste e baixas tenacidade e usinabilidade. É classificado como um material de difícil soldagem, sendo ainda considerado como o primeiro produto para a fabricação dos ferros fundidos maleáveis (DE PARIS, 2003). Por fim, boas resistências à corrosão e à oxidação ainda podem ser verificadas nesses metais, mediante a adição de elementos de liga, como o silício, o níquel e o cromo (KRAUSS, 1990).

3.1.2.2. ferros fundidos cinzentos

Os ferros fundidos cinzentos, apontados como os ferros fundidos mais aplicados industrialmente, exibem teores de carbono e silício que variam entre 2,5% e 4% e 1% e 3%, respectivamente (CALLISTER, 2008; DE PARIS, 2003). Apresentam até cerca de 0,8% de carbono na forma combinada, como cementita, e o resto como grafita (DE PARIS, 2003), constituinte que aparece em forma de veios, conforme os exemplos exibidos na Figura 3.6, ferros fundidos cinzentos com matrizes predominantemente ferrítica e perlítica (CALLISTER, 2008; MALUF, 2007). Ressalta-se que essas ligas podem ainda apresentar matriz ferrítica perlítica, com diferentes quantidades de cada constituinte.

Figura 3.6 – Exemplos de micrografias de ferros fundidos cinzentos.

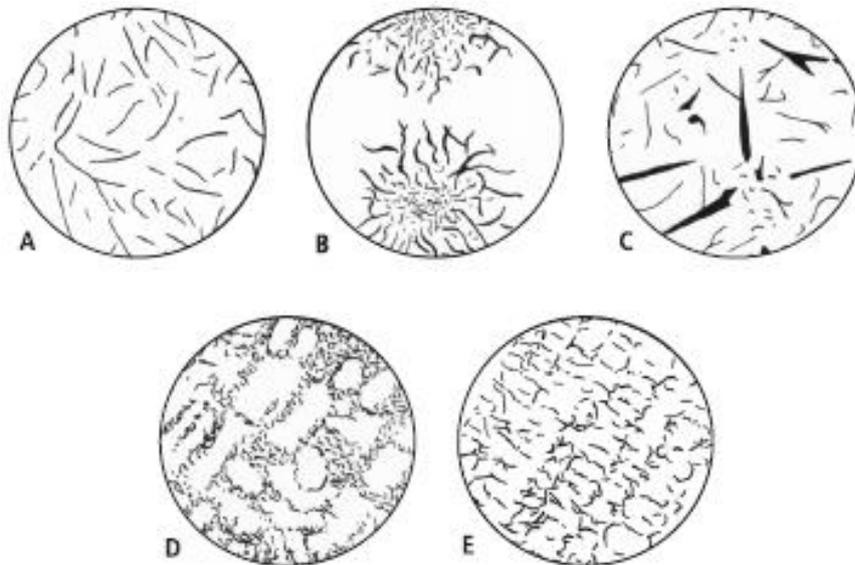


(a) matriz predominantemente ferrítica e (b) matriz perlítica.

Fonte: CALLISTER, 2008; MALUF, 2007.

Os veios de grafita do ferro fundido cinzento podem ser subdivididos em cinco categorias, designadas pelas letras A, B, C, D e E, cuja morfologia depende, principalmente, da velocidade de resfriamento e do teor de silício da liga resultante (DE PARIS, 2003). Na Figura 3.7 pode ser verificada a representação das cinco formas da grafita em veios segundo a Norma ISO 945/1975 (GUESSER, 2009) e na Figura 3.8 exemplos de microestruturas contendo os tipos de grafita apresentados (SANTOS & BRANCO, 1991).

Figura 3.7 – Tipos de grafita em veios nos ferros fundidos cinzentos, segundo a Norma ISSO 945/1975.

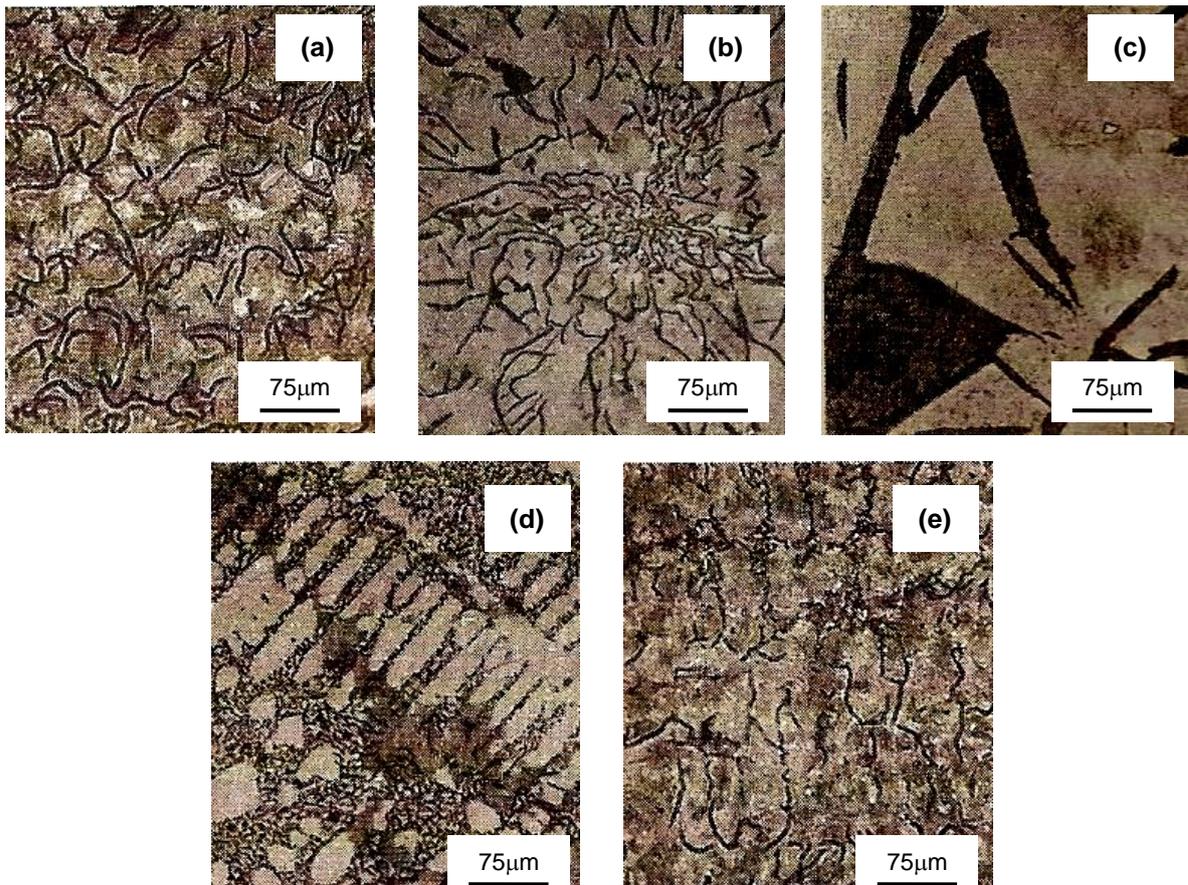


Fonte: GUESSER, 2009.

O limite de resistência dos ferros fundidos cinzentos se situa numa faixa de 100 MPa a 400 MPa (GUESSER, 2009). A forma da grafita em veios conduz a altos valores de condutividade térmica, o que leva esses ferros fundidos a serem muito empregados em componentes submetidos a elevados ciclos térmicos, tais como: tambores e discos de freio, cabeçote de motores de combustão interna, entre outros. Outra propriedade importante é a capacidade de amortecimento de vibrações, sendo atrativo o seu emprego em bases de máquinas. Por fim, são relacionadas a essas ligas características como boa usinabilidade, alta fluidez na temperatura de fusão,

elevada resistência ao desgaste, fragilidade e custo relativamente baixo. Sua baixa resistência à tração é relacionada à morfologia dos veios de grafita, que atuam como pequenas trincas internas, tornando o material frágil (DE PARIS, 2003).

Figura 3.8 – Exemplos de micrografias de ferros fundidos cinzentos contendo as cinco formas de grafita em veios.



(a) Tipo A, (b) Tipo B, (c) Tipo C, (d) Tipo D e (e) Tipo E.

Fonte: SANTOS & BRANCO, 1991.

A grafita presente nos ferros fundidos reduz o seu módulo de elasticidade para valores abaixo dos de aços com matrizes similares. Nos ferros fundidos cinzentos, a interrupção da matriz provocada pela grafita lamelar diminui consideravelmente o módulo de elasticidade (GUESSER, 2009). Além disso, a curva tensão-deformação em ferros fundidos cinzentos não apresenta um trecho linear como nos aços, ou seja, a relação entre tensão e deformação em um ferro fundido cinzento durante o

regime elástico não é constante, mas uma curva com inclinação continuamente decrescente. Este comportamento não linear e a histerese associada são causados, em parte, pela energia absorvida por fricção entre a partícula de grafita e a matriz, assim como pela microplasticidade nas redondezas da partícula de grafita (GUESSER, 2009).

Os ferros fundidos cinzentos, assim como as demais ligas fundidas, tem suas propriedades mecânicas dependentes da velocidade de solidificação. Neste caso, a solidificação lenta leva à formação de dendritas e células eutéticas de dimensões elevadas, além de possibilitar um longo tempo para segregação. A presença de partículas grosseiras pode implicar em concentração de tensão durante a sollicitação mecânica, facilitando os fenômenos de nucleação e de crescimento de trincas. Por fim, segregação de elementos de liga e de impurezas implica na ocorrência de heterogeneidade de propriedades mecânicas.

3.1.2.3. ferros fundidos maleáveis

A primeira tentativa de se produzir ferros fundidos mais tenazes data do princípio do século XVIII, período no qual teria sido desenvolvido o chamado ferro fundido maleável branco, seguido, no início do século XIX, do desenvolvimento do ferro fundido maleável preto ou de núcleo preto (COLPAERT, 2009).

Os ferros fundidos maleáveis são aqueles obtidos a partir da realização de tratamentos térmicos de maleabilização nos ferros fundidos brancos, apresentando em sua microestrutura final grafita com contornos rendilhados ou em agregados (CHIAVERINI, 1987). Nesse caso, a cementita presente nos ferros fundidos brancos é metaestável e, quando submetida a um tratamento térmico prolongado, em elevadas temperaturas (da ordem de 900°C), se decompõe para formar austenita e as partículas de grafita mencionadas (DE PARIS, 2003). Em geral, esses materiais exibem como características principais resistência mecânica à tração similar àquela observada nos aços e boa ductilidade.

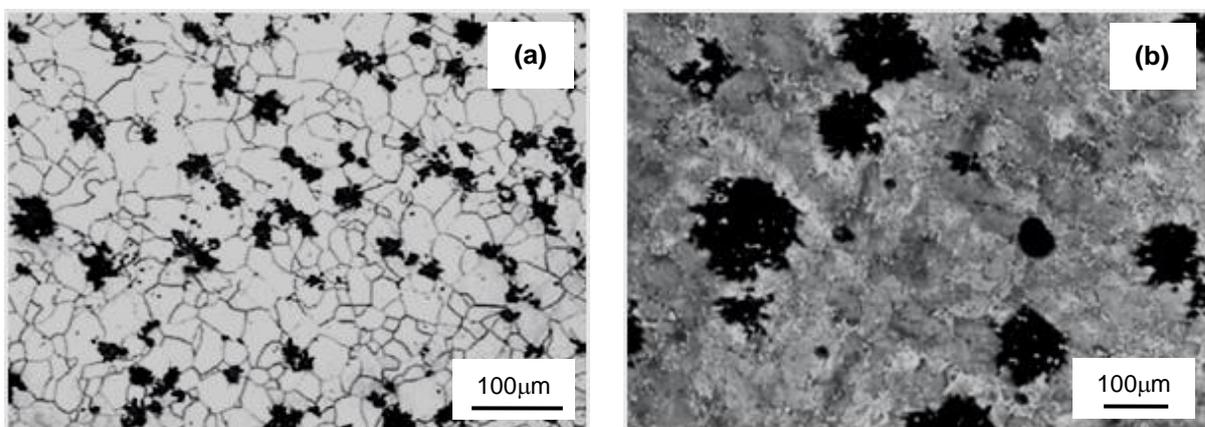
Na produção do ferro fundido maleável de núcleo branco, o ferro é fundido como um componente de ferro fundido branco. Em seguida, o material é descarbonetado,

durante um tratamento térmico. Peças finas chegam a descarbonetar em toda a espessura, enquanto as peças de maior espessura só apresentam uma camada descarbonetada, na periferia da peça. Os ferros fundidos tratados desta forma apresentam uma fratura de aspecto claro no centro da peça e são, por isto, chamados de ferros fundidos maleáveis de núcleo branco, sendo denominados também como ferros maleáveis europeus.

Na fabricação de componentes de ferro fundido maleável de núcleo preto, um tratamento térmico inicial para a ocorrência de grafitação é conduzido, realizado a temperaturas entre 900°C a 970°C. Em termos de tempo, em geral composições químicas consideradas adequadas podem ser grafitizadas em cerca de 3,5 horas, enquanto que, dependendo das condições do material no seu estado inicial e de sua composição química, patamares de até 20 horas podem ser necessários à operação. Embora esse tratamento térmico após a fundição represente um custo adicional na produção de um componente, o ferro fundido maleável de núcleo preto continua sendo uma liga importante, mesmo depois do desenvolvimento do ferro fundido nodular (COLPAERT, 2009).

Na Figura 3.9 podem ser observados exemplos de micrografias de ferros fundidos maleáveis de núcleo preto, de matriz ferrítica e predominantemente perlítica (COLPAERT, 2008).

Figura 3.9 – Exemplos de micrografias de ferros fundidos maleáveis.



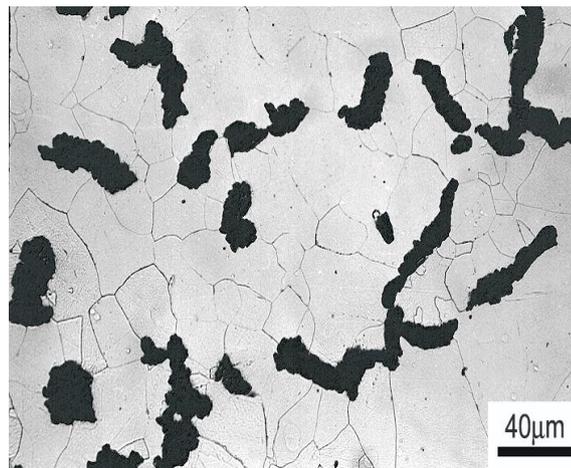
(a) Matriz ferrítica e (b) Matriz perlítica.

Fonte: COLPAERT, 2008.

3.1.2.4. ferros fundidos vermiculares

Os ferros fundidos vermiculares são a classe mais recente de ferros fundidos, sendo também caracterizados pela presença de grafita, que se apresenta predominantemente em forma de vermes ou compacta (GUESSER, 2009). Essa morfologia é considerada intermediária entre a grafita em veios, típica do ferro fundido cinzento, e a grafita em nódulos, que aparece no ferro fundido nodular. Na Figura 3.10 pode ser observada uma fotomicrografia de um ferro fundido vermicular de matriz ferrítica (MALUF, 2007). Similarmente à morfologia da grafita, as propriedades destes ferros fundidos são intermediárias, ou seja, situam-se entre as dos ferros fundidos cinzentos e as dos ferros fundidos nodulares.

Figura 3.10 – Exemplo de micrografia de um ferro fundido vermicular.



Fonte: MALUF, 2007.

3.1.3. Ferros fundidos nodulares

Os ferros fundidos nodulares foram desenvolvidos no intuito de combinar propriedades consideradas interessantes dos ferros fundidos e dos aços (COLPAERT, 2008), como a capacidade de fundição dos primeiros e a tenacidade dos segundos. Apesar das características citadas, a princípio, serem observadas nos ferros fundidos maleáveis, o elevado custo decorrente dos tratamentos térmicos requeridos e a dificuldade de fundir componentes de ferro fundido branco sem

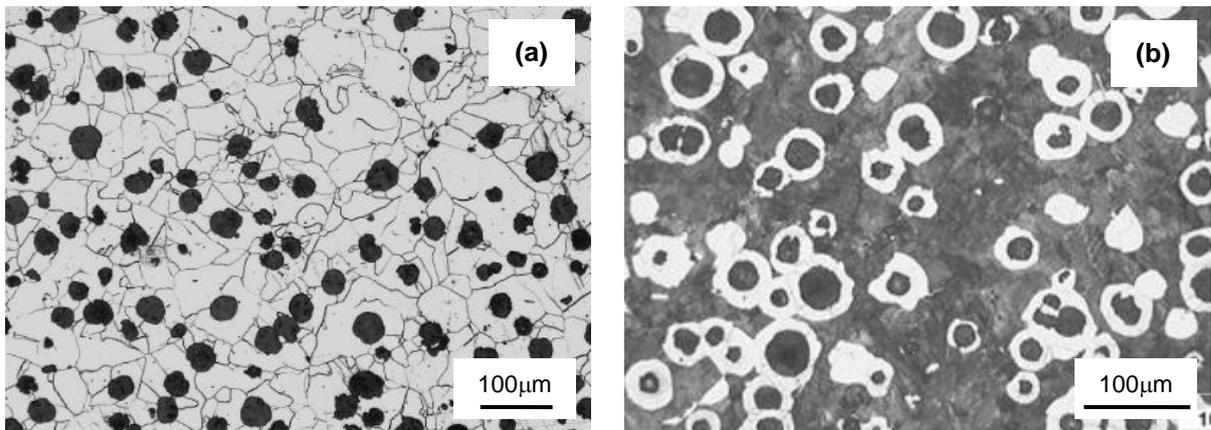
defeitos limitaram sua utilização, levando, desta forma, à necessidade de elaboração de outra alternativa. Dentro deste contexto, na metade do século XX (em 1948) foi apresentado o ferro fundido nodular, com obtenção de patente do mesmo no ano seguinte (LABRECQUE & CAGNE, 1998).

Os ferros fundidos nodulares, também conhecidos como ferros fundidos dúcteis, apresentam a grafita na forma de nódulos. A morfologia da grafita, neste caso, não interfere na continuidade da matriz, tal como ocorre com o ferro fundido cinzento, que apresenta a grafita em veios, resultando em boas características de resistência mecânica à tração, ductilidade e tenacidade. A obtenção da grafita na forma esferoidal é feita pela adição de elementos como o magnésio (0,03% a 0,05%) e o cério (0,005% a 0,020%) no metal ainda no estado líquido, conforme descrito anteriormente (DE PARIS, 2003). Além desses elementos, em termos de composição química, os ferros fundidos nodulares exibem geralmente teor de carbono entre 3,5% e 3,8% e teor de silício entre 1,8% e 2,8%, podendo conter ainda cobre, níquel molibdênio e manganês (LABRECQUE & CAGNE, 1998).

Na Figura 3.11 podem ser observadas como exemplos fotomicrografias de ferros fundidos nodulares de matriz ferrítica e predominantemente perlítica (COLPAERT, 2008). Similarmente aos ferros fundidos cinzentos, os ferros fundidos nodulares podem exibir grafita com morfologias diversas, classificadas de I a VII, de acordo com a Norma ASTM A 247-67, que são representados na Figura 3.12 (SANTOS & BRANCO, 1991).

Ainda em termos de microestrutura, é relativamente comum a realização de tratamentos térmicos, especialmente a austêmpera, que possibilita aumento da resistência mecânica com manutenção da tenacidade do ferro fundido nodular. Na Figura 3.13 são apresentados exemplos de resultados obtidos para uma liga com 3,6%C; 2,5%Si; 0,056%P; 0,052%Mg; 0,7%Cu submetida ao tratamento mencionado, porém em condições distintas. Neste caso, para ambos processamentos, verifica-se a ocorrência de uma matriz com ferrita acicular α , martensita M e austenita γ (ASM HANDBOOK, 2004).

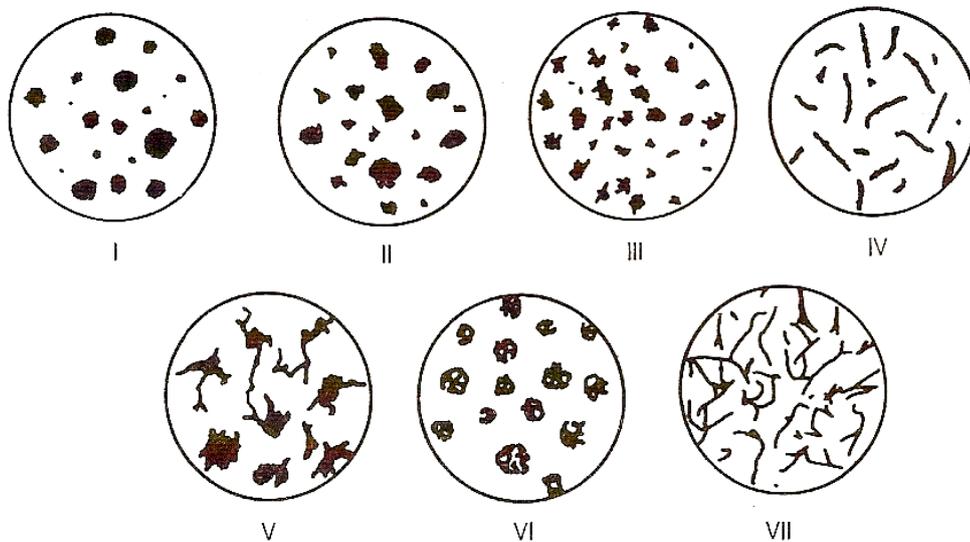
Figura 3.11 – Exemplos de micrografias de ferros fundidos nodulares.



(a) Matriz ferrítica e (b) Matriz perlítica ferrítica.

Fonte: COLPAERT, 2008.

Figura 3.12 – Tipos de grafita em nódulos nos ferros fundidos nodulares, segundo a Norma ASTM A 247-67.

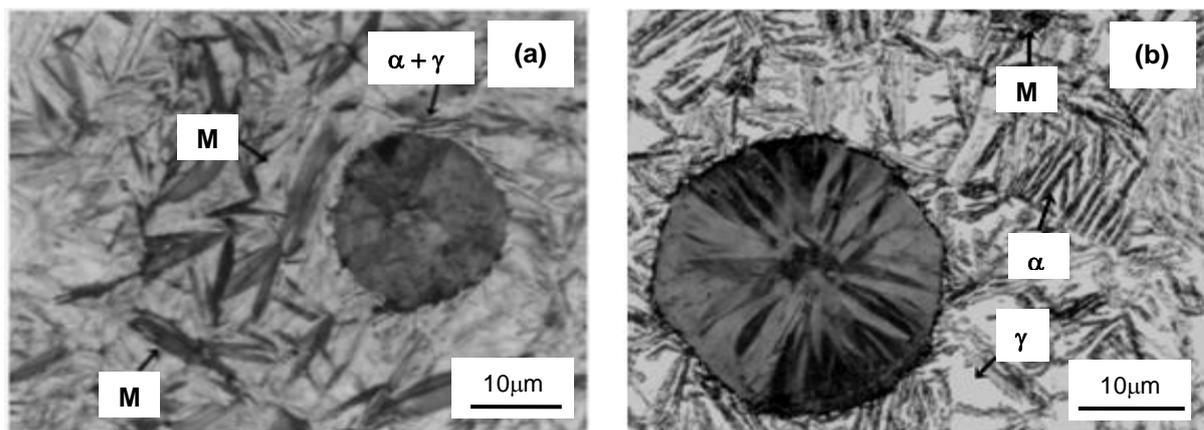


Fonte: SANTOS & BRANCO, 1991.

As propriedades dos ferros fundidos nodulares são influenciadas por uma série de fatores, representados na Figura 3.14, tais como a quantidade dos elementos que promovem a nodularização, a presença de outros elementos de liga, o percentual de cada constituinte da matriz, a velocidade de resfriamento, dentre outros (GUESSER, 2009). Nas Figuras 3.15 e 3.16 são exibidos gráficos com exemplos das propriedades mecânicas de ferros fundidos nodulares, em termos de limite de

resistência, dureza e alongamento %, para diferentes classes dessas ligas; e de tenacidade, de acordo com a quantidade de perlita na matriz e a temperatura. Nota-se que, em termos de limite de resistência, pode-se obter desde cerca de 400MPa até 800MPa. Em termos de dureza, uma variação de aproximadamente de 140HB até cerca de 320HB pode ser verificada. Já o alongamento, aparece na faixa de 2% a 17%. Por fim, observa-se que a energia absorvida no ensaio de impacto pode variar de valores inferiores a 5J até cerca de 25J, de acordo com as características da matriz e a temperatura de realização dos testes.

Figura 3.13 – Exemplos de micrografias de um ferro fundido nodular austemperado exibindo na matriz ferrita acicular α , martensita M e austenita γ .

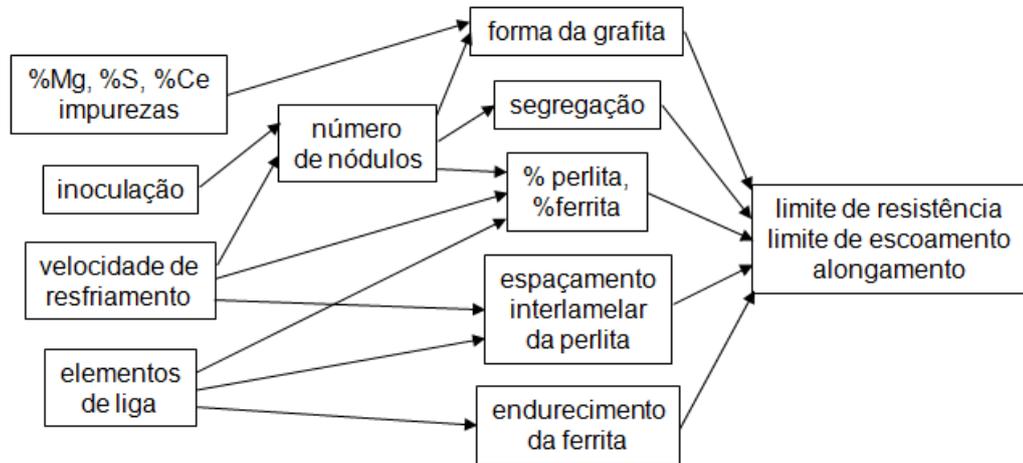


(a) Aquecimento a 900°C, encharque de 120 minutos, banho de sal a 360°C por 2 minutos e resfriamento ao ar; (b) Aquecimento a 900°C, encharque de 120 minutos, banho de sal a 360°C por 120 minutos e resfriamento ao ar.

Fonte: ASM HANDBOOK, 2004.

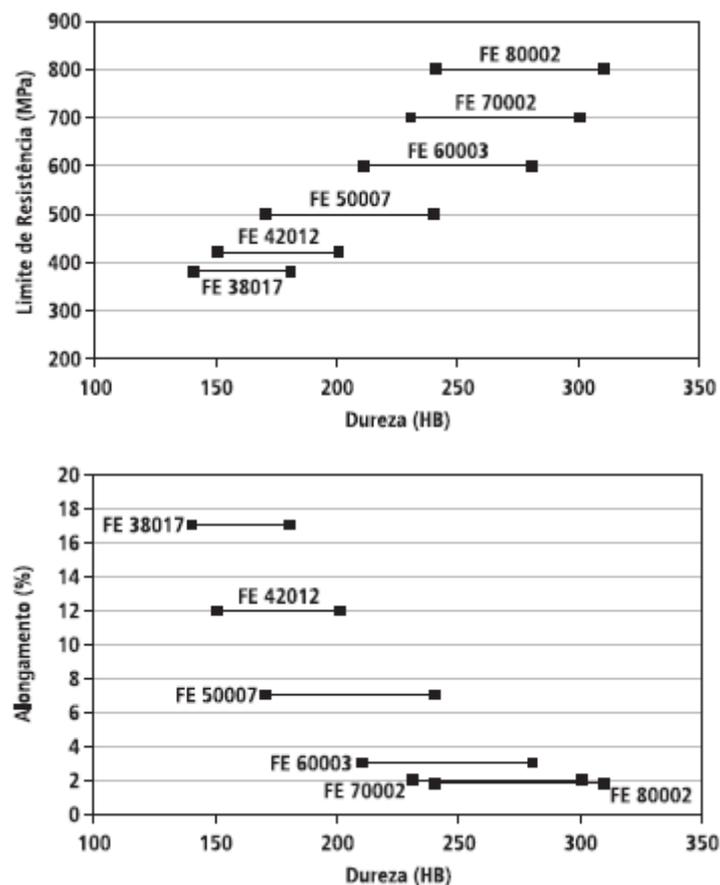
De maneira geral, associando a microestrutura desenvolvida às propriedades do ferro fundido nodular, a liga exibindo nódulos de grafita em uma matriz ferrítica apresenta boas ductilidade e tenacidade, com também relativamente bons limites de escoamento e resistência, compatíveis com um aço de teor de carbono reduzido (GONZAGA, 2013). Por outro lado, a presença dos nódulos de grafita em uma matriz perlítica implica em alta resistência mecânica, boa resistência ao desgaste e moderadas ductilidade e tenacidade. Em um ferro fundido nodular exibindo matriz ferrítica e perlítica as propriedades são consideradas intermediárias.

Figura 3.14 – Representação das variáveis de influência nas propriedades mecânicas dos ferros fundidos nodulares com matriz de ferrita e perlita.



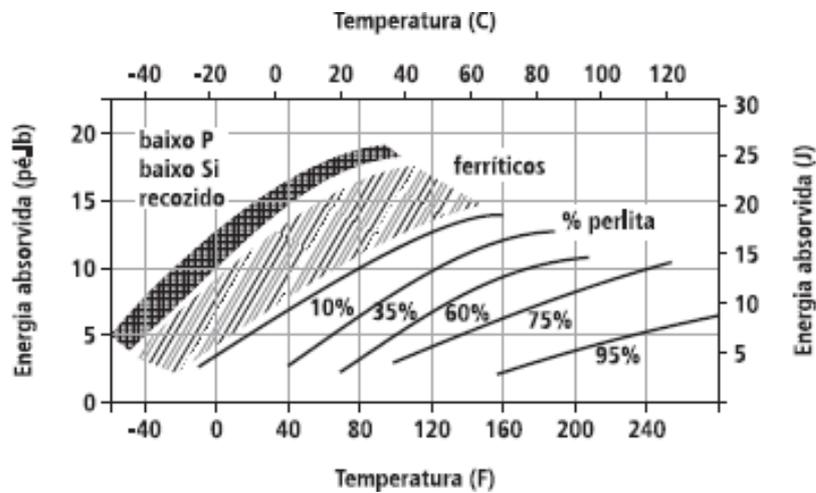
Fonte: GUESSER, 2009.

Figura 3.15 – Limite de resistência, alongamento % e dureza de diferentes classes de ferros fundidos nodulares.



Fonte: GUESSER, 2009.

Figura 3.16 – Efeito da quantidade de perlita e da temperatura na tenacidade do ferro fundido nodular.



Fonte: GUESSER, 2009.

3.2. Processo de Soldagem

3.2.1. Aspectos gerais dos processos de soldagem

De acordo com a AWS (American Welding Society), a soldagem é entendida como: “Processo de união de materiais usado para obter a coalescência (união) localizada de metais e não metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem utilização de pressão e/ou material de adição” (MARQUES et al., 2009).

A soldagem é hoje o principal processo usado na união permanente de peças metálicas, permitindo a montagem de conjuntos com rapidez, segurança e economia de material. Por exemplo, a ligação de chapas metálicas com parafusos ou rebites exige que as chapas sejam furadas, causando uma perda de seção de até 10%, que deve ser compensada por uma espessura maior das peças. A utilização de chapas de reforço e os próprios parafusos e porcas ou rebites aumenta ainda mais o peso final da estrutura. Na união de tubos pode-se fazer considerações semelhantes ao se comparar juntas soldadas com juntas rosqueadas (MARQUES et al., 2009).

Comparando-se o processo de soldagem à fundição, como processo de fabricação, constata-se que a soldagem apresenta características interessantes, como: possibilidade de se terem grandes variações de espessura na mesma peça e inexistência de uma espessura mínima para adequado preenchimento do molde com metal fundido, possibilidade de se usarem diferentes materiais numa mesma peça, de acordo com as solicitações de cada parte, maior flexibilidade em termos de alterações no projeto da peça a ser fabricada e menor investimento inicial (MARQUES et al., 2009).

A soldagem é muito versátil em termos de tipos de ligas metálicas e das espessuras que podem ser unidas. A disponibilidade de um grande número de processos de soldagem permite a união da maioria das ligas metálicas comumente utilizadas. Pode-se unir, através dos diferentes processos de soldagem, desde peças com espessura inferior a 1mm até estruturas de grandes dimensões (MARQUES et al., 2009).

Os processos de soldagem têm sido usados intensivamente na fabricação de produtos tais como: veículos rodoviários e ferroviários, estruturas prediais, pontes, navios, oleodutos, gasodutos, plataformas marítimas, aviões, eletrodomésticos, reatores nucleares, trocadores de calor, componentes eletrônicos entre outros. A Figura 3.17 mostra a evolução dos processos de soldagem ao longo do tempo, evidenciando o seu grande incremento a partir da segunda guerra mundial, devido à fabricação de navios e aviões soldados, mesmo tendo sido o arco elétrico desenvolvido no século XIX (WAINER et al., 1995).

Como exemplo da intensiva utilização da soldagem cita-se o fato de que aproximadamente 3% do peso do casco de um navio seja de consumíveis de soldagem. Acrescente-se ainda que a utilização da soldagem na construção naval alterou totalmente os procedimentos construtivos que, à época da rebitagem, eram desenvolvidos quase que inteiramente junto à carreira ou dique de construção nos estaleiros. A partir daí a soldagem permitiu a subdivisão da construção do navio, e, em particular, de seu casco em vários componentes independentes e efetuar a sua edificação final na mesma carreira ou dique, mas de modo ordenado e racional.

Figura 3.17 – Evolução dos processos de soldagem ao longo do tempo.



Fonte: WAINER et al., 1995.

Analisando-se a definição da AWS, pode-se observar que para obter uma união soldada há necessidade de aquecimento até uma temperatura adequada. Assim, deve-se ter uma fonte geradora de calor para atingir tal temperatura.

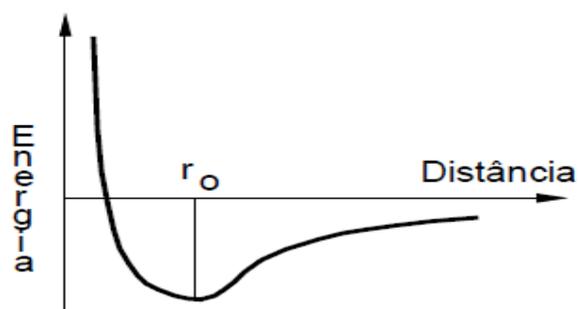
Atualmente, os processos de soldagem que utilizam a fonte de origem elétrica são os mais utilizados, devido tanto ao alto desenvolvimento dos equipamentos como à alta eficiência na transformação da energia elétrica em calor. Dentro deste contexto, o arco elétrico é apontado como a fonte de calor mais utilizada na soldagem por fusão de materiais metálicos, exibindo uma combinação atrativa de características, incluindo uma concentração adequada de energia para a fusão localizada do metal de base, facilidade de controle, baixo custo relativo do equipamento e um nível aceitável de riscos à saúde de seus operadores (MARQUES et al., 2009). Os processos a arco elétrico convencionais de maior utilização são: soldagem a arco com eletrodos revestidos (Shielded Metal Arc Welding SMAW), soldagem a arco com proteção gasosa (Gas Metal Arc Welding GMAW), soldagem a arco com arame

tubular (Flux-Cored Arc Welding FCAW), soldagem a arco submerso (Submerged Arc Welding SAW) e soldagem ao arco com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa (Gas Tungsten Arc Welding GTAW)

3.2.2. Formação de uma junta soldada

Os materiais metálicos no estado sólido apresentam como característica principal a sua microestrutura. A microestrutura é resultante dos arranjos dos átomos que compõem o material e pode ser observada, com auxílio de microscópios, em amostras polidas e convenientemente atacadas quimicamente. Nesta condição, os metais apresentam uma estrutura cristalina, que é caracterizada pela ordenação de longo alcance dos átomos, seguindo modelos geométricos bem definidos denominados células unitárias (SANTOS, 2006). Átomos localizados no interior desta estrutura são cercados por um número de vizinhos mais próximos, posicionados a uma distância r_0 , na qual a energia do sistema é mínima, conforme pode ser observado na Figura 3.18 (MODENESI & MARQUES, 1991).

Figura 3.18 – Variação da energia potencial de um sistema composto por dois átomos em função da separação entre eles.

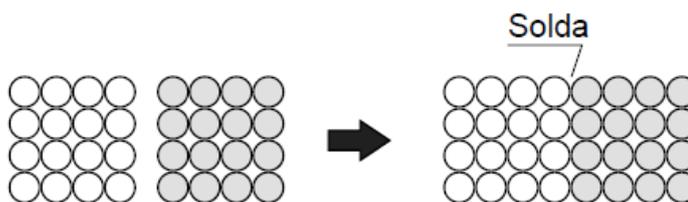


Fonte: MODENESI & MARQUES, 2011.

Nesta situação, cada átomo está em sua condição de energia mínima, não tendendo a se ligar com nenhum átomo extra. Na superfície do sólido, contudo, esta situação não se mantém, pois os átomos estão ligados a menos vizinhos, possuindo,

portanto, um maior nível de energia do que os átomos no seu interior. Esta energia pode ser reduzida quando os átomos da superfície se ligam a outros. Assim, aproximando duas peças metálicas a uma distância suficientemente pequena para a formação de uma ligação permanente, uma solda entre as peças seria formada, como mostrado na Figura 3.19 (MODENESI & MARQUES, 1991).

Figura 3.19 – Obtenção de uma solda por aproximação das superfícies a unir.

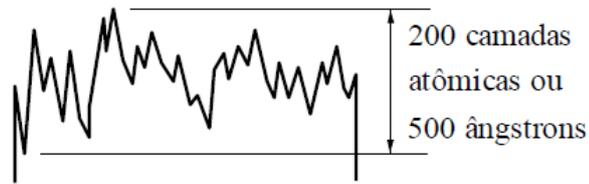


Fonte: MODENESI & MARQUES, 2011.

Entretanto, o fenômeno mostrado na Figura 3.19 não ocorre usualmente para duas peças metálicas, exceto em condições muito especiais, cuja explicação está na existência de obstáculos que impedem uma aproximação efetiva das superfícies até distâncias da ordem de r_0 . Estes obstáculos podem ser de dois tipos básicos: a) as superfícies metálicas, mesmo as mais polidas, apresentam uma grande rugosidade em escala microscópica e submicroscópica (exemplo na Figura 3.20) e b) as superfícies metálicas estão normalmente recobertas por camadas de óxidos, umidade, gordura, poeira, dentre outros.

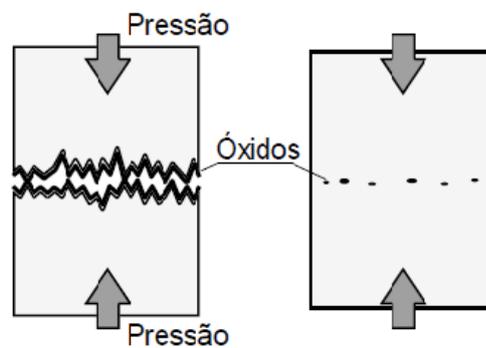
Para superar os obstáculos mencionados, dois métodos principais são utilizados, originando os dois grandes grupos de processos de soldagem (MARQUES, 1991; MODENESI & MARQUES, 2012). O primeiro consiste em deformar as superfícies de contato, permitindo a aproximação dos átomos a distâncias da ordem de r_0 (Figura 3.21). As peças podem ser aquecidas localmente de modo a facilitar a deformação das superfícies. O segundo método se baseia na aplicação localizada de calor na região da junta até a fusão do metal de base e do metal de adição, quando este é utilizado. Como resultado desta fusão, as superfícies entre as peças são eliminadas e, com a solidificação do metal fundido, a solda é formada (Figura 3.22)

Figura 3.20 – Corte transversal de uma superfície polida.



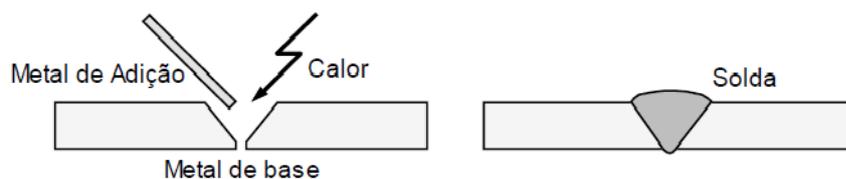
Fonte: MODENESI & MARQUES, 2011.

Figura 3.21 – Soldagem por pressão.



Fonte: MODENESI & MARQUES, 2011.

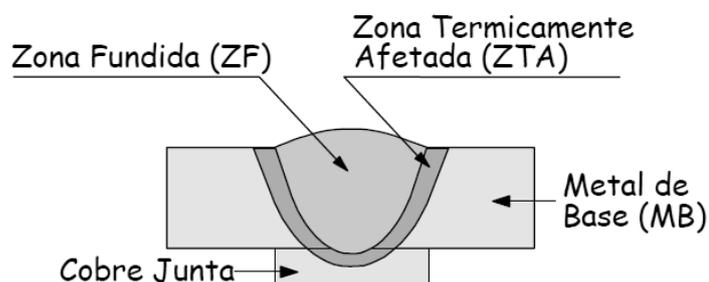
Figura 3.22 – Soldagem por fusão.



Fonte: MODENESI & MARQUES, 2011.

Durante a soldagem de um material metálico, uma variação de gradiente térmico é verificada tanto no metal de solda como na zona termicamente afetada (ZTA). Isto resulta em diferentes microestruturas e propriedades. As várias microestruturas podem ser caracterizadas dentro de diferentes zonas e regiões, conforme a Figura 3.23, na qual são mostradas a zona fundida ZF, a zona termicamente afetada ZTA e o metal de base MB (MODENESI, 2008).

Figura 3.23 – Zonas e regiões no material soldado.



Fonte: MODENESI, 2008.

A natureza e tamanho relativo destas zonas são determinados pelo calor gerado durante a soldagem, pela composição do metal soldado e do metal de adição utilizado:

- zona fundida (ZF): região onde houve a fusão do material e sua solidificação durante a operação de soldagem. As temperaturas de pico desta região foram superiores à temperatura de fusão (T_f) do metal de base;
- zona termicamente afetada (ZTA): região não fundida do metal de base que teve a sua microestrutura e/ou propriedades alteradas pelo ciclo térmico. As temperaturas nesta região foram superiores à temperatura crítica do material sendo soldado porém inferiores à sua temperatura de fusão;
- metal de base (MB): Região em que as temperaturas atingidas foram inferiores à temperatura crítica do material e não afetadas pelo processo de soldagem.

3.2.3. Soldagem a arco com eletrodo revestido SMAW

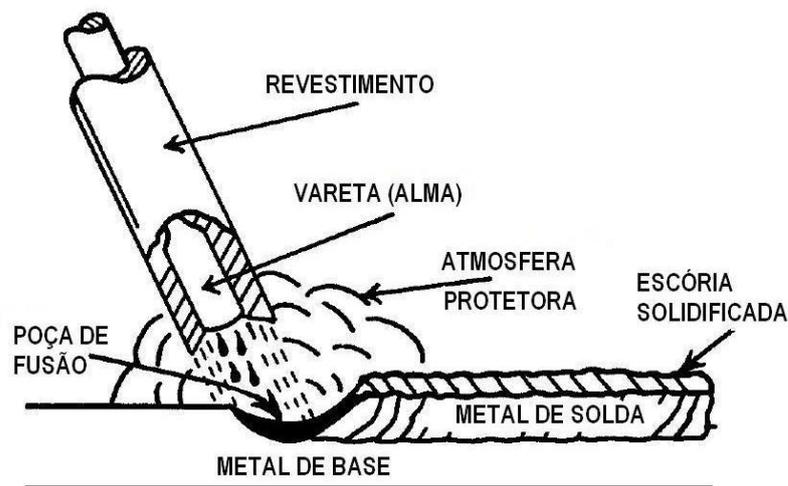
A soldagem a arco elétrico com eletrodos revestidos é um processo que produz a união dos metais de base pela fusão localizada dos mesmos através do aquecimento pelo calor gerado pelo arco elétrico estabelecido entre um eletrodo revestido e a peça que está sendo soldada.

O calor produzido pelo arco funde o metal de base, a alma do eletrodo e o revestimento. Quando as gotas de metal fundido são transferidas através do arco

para a poça de fusão, são protegidas da atmosfera pelos gases produzidos durante a decomposição do revestimento. A escória líquida flutua em direção à superfície da poça de fusão, onde protege o metal de solda da atmosfera durante a solidificação. Outras funções do revestimento são proporcionar estabilidade ao arco e controlar a forma do cordão de solda. Na Figura 3.24 pode ser observada uma representação do processo de soldagem ao arco elétrico com eletrodo revestido. Ressalta-se que esse processo é o grande responsável pela expansão da soldagem e foi o primeiro a obter aceitação como método produtivo e de alta qualidade (MACHADO, 1966).

A invenção do eletrodo revestido deve-se ao engenheiro sueco Oskar Kjellberg, cuja patente foi obtida em 1905. Kjellberg percebeu que com a aplicação de um revestimento, no então eletrodo nu, minimizam-se vários inconvenientes até então presentes nas soldas produzidas tais como: formação de grandes quantidades de óxidos devido à contaminação pelo ar atmosférico e grande dificuldade de abertura e manutenção do arco elétrico.

Figura 3.24 – Representação do processo de soldagem ao arco elétrico com eletrodo revestido.



Fonte: ESAB, 2005.

O eletrodo revestido consiste de uma vareta metálica, chamada “alma”, trefilada ou fundida, que conduz a corrente elétrica e fornece metal de adição para enchimento

da junta. A alma é recoberta por uma mistura de diferentes materiais, numa camada que forma o revestimento do eletrodo (MARQUES 1991).

Segundo Machado (1996), o revestimento tem diversas funções na soldagem, mencionadas a seguir.

- metalúrgicas - proteção do metal durante a sua transferência, através da geração de gases e escória; desoxidação da poça de fusão; em certos casos, transferir elementos de liga; transferir o mínimo possível de hidrogênio para a poça de fusão, pois esse elemento coopera para a produção de trincas e porosidade;
- controle do arco - possuir elementos com alto potencial de ionização, de forma a facilitar a ignição e reignição do arco; estabilizar o arco; regular a penetração e diminuir a produção de salpicos;
- operação e manutenção - produzir escória com intervalo de fusão conveniente, solidificando após o metal de solda, produzir escória com adequada viscosidade, produzir escória com adequada tensão interfacial com o metal de solda (geometria do cordão) e produzir escória que seja facilmente destacável produzir escória que seja facilmente destacável.

Dependendo dos compostos empregados e da proporção com que os mesmos se encontram no revestimento, os eletrodos podem ser classificados nos seguintes principais tipos: ácido, básico, celulósico, oxidante e rutílico (MACHADO 1996):

Os consumíveis ácidos praticamente não são mais produzidos, pois apesar do metal de solda apresentar relativamente boa aparência, os mesmos possuem muito baixas propriedades mecânico/metalúrgicas, sendo efervescentes (alto conteúdo de oxigênio). Esses revestimentos contêm altos teores de óxidos de ferro e manganês, além de silicatos de alumínio e ferro manganês. A escória ácida é produzida em abundante quantidade, com aparência de favos (porosa) e facilmente destacável. O metal de solda produzido por esses eletrodos é o mais suscetível, dentre todos, à trincas de solidificação e, portanto, os elementos carbono, enxofre e fósforo devem se encontrar em muito baixos teores.

Os eletrodos básicos costumam levar os metais de solda a apresentar as melhores propriedades mecânico/metalúrgicas entre todos os eletrodos, destacando-se a

tenacidade. Portanto, esses eletrodos devem ser preferido onde são grandes essas solicitações. Nesse caso, o revestimento contém elevados teores de carbonato de cálcio e fluorita, com dificuldades para operar em corrente alternada, quando o conteúdo desse último composto é excessivamente elevado. O metal depositado é altamente desoxidado e com muito baixo nível de inclusões complexas de sulfetos e fosfetos. A alta qualidade do metal de solda produzido com esse consumível é devida primariamente aos efeitos do carbonato e da fluorita, já que os mesmos controlam as impurezas, como enxofre e fósforo, via a escória e, também, pela formação de muito pequenas inclusões não metálicas. Por outro lado, a fluorita pode ser considerada um composto metalurgicamente “básico”, parcialmente regulando o silício e o oxigênio do metal de solda dos aços e a formação de CO_2 , proveniente da decomposição do CaCO_3 , diminui a pressão parcial do hidrogênio no arco e, portanto, coopera para a redução desse elemento no metal de solda. Após a extrusão, esses eletrodos são secos à relativamente alta temperatura, sendo esta operação extremamente efetiva. Entretanto, após rápido contato com a atmosfera, estes consumíveis somente poderão ser considerados como “baixo hidrogênio”, se forem devidamente ressecados antes do uso, pois o revestimento é altamente higroscópico, por praticamente não conter material orgânico. A ressecagem geralmente ocorre em até 400°C .

Os eletrodos celulósicos são caracterizados pela elevada produção de gases, os quais são resultantes da combustão dos materiais orgânicos que contém (alto teor de celulose). Os principais gases gerados são CO_2 , CO , H_2 , H_2O (vapor) e seus subprodutos. O hidrogênio não é proveniente somente da celulose mas, também, da umidade contida na mesma e no silicato. Entretanto, esses eletrodos não devem ser ressecados mas, se o forem, a temperatura não pode ultrapassar de 100°C , sob pena de destruir as propriedades operacionais do consumível. A atmosfera redutora que se forma, é a principal responsável pela proteção do metal fundido da atmosfera ambiente. Porém, o nível de hidrogênio depositado no metal de solda é muito alto, impedindo seu uso em estruturas muito constrangidas e/ou cujo material seja suscetível a trincas nas quais esse elemento é um dos principais agentes. A penetração é alta, sendo produzida pouca escória, a qual é facilmente destacável.

Os eletrodos oxidantes são considerados obsoletos, pois as propriedades mecânicas do metal de solda são muito baixas, notavelmente a tenacidade. Uma possível utilização para os mesmos é para a soldagem subaquática. O revestimento é principalmente constituído por óxido de ferro (hematita ou magnetita) com ou sem óxido de manganês, além de silicatos. A penetração é pequena, com escória espessa e facilmente destacável.

O eletrodo rutilico é considerado um consumível de uso geral, cujo revestimento apresenta até 50% de rutilo, com alguns tipos contendo até 15% de celulose. A transferência do metal é realizada por gotas maiores do que aquelas produzidas nos eletrodos ácidos. A penetração é média, com escória de rápida solidificação e facilmente destacável. O metal de solda pode apresentar um nível de hidrogênio alto.

3.2.4. Soldagem dos ferros fundidos

Conforme discutido anteriormente, a soldagem envolve a aplicação de calor e/ou deformação, com ou sem metal de adição, para produzir a união localizada do metal de base. “Uma das dificuldades, senão a principal, na soldagem de ferros fundidos, é a sua tendência para formar estruturas duras e frágeis na ZTA”. (PARIS, 2003).

Vários aspectos podem contribuir para dificultar a soldagem dos ferros fundidos, tais como: alto teor de carbono e, em geral, de fósforo e de enxofre; tendência à formação de martensita na região da solda devido às velocidades de resfriamento relativamente elevadas associadas com a soldagem; baixa ductilidade do metal base e de sua zona termicamente afetada; além da estrutura porosa dos ferros fundidos cinzento, maleável e nodular favorecer a absorção de graxas e outras sujeiras durante o seu uso (MODENESI, 2008B).

Os ferros fundidos brancos são considerados, em geral, não soldáveis devido a sua extrema fragilidade. A soldagem pode ser utilizada em ferros fundidos cinzentos, maleáveis, nodulares e vermiculares, principalmente para eliminar defeitos de fundição e para reparar peças trincadas ou mesmo fraturas.

Com base no tipo de metal de adição utilizado, a soldagem dos ferros fundidos pode ser dividida em dois grupos principais:

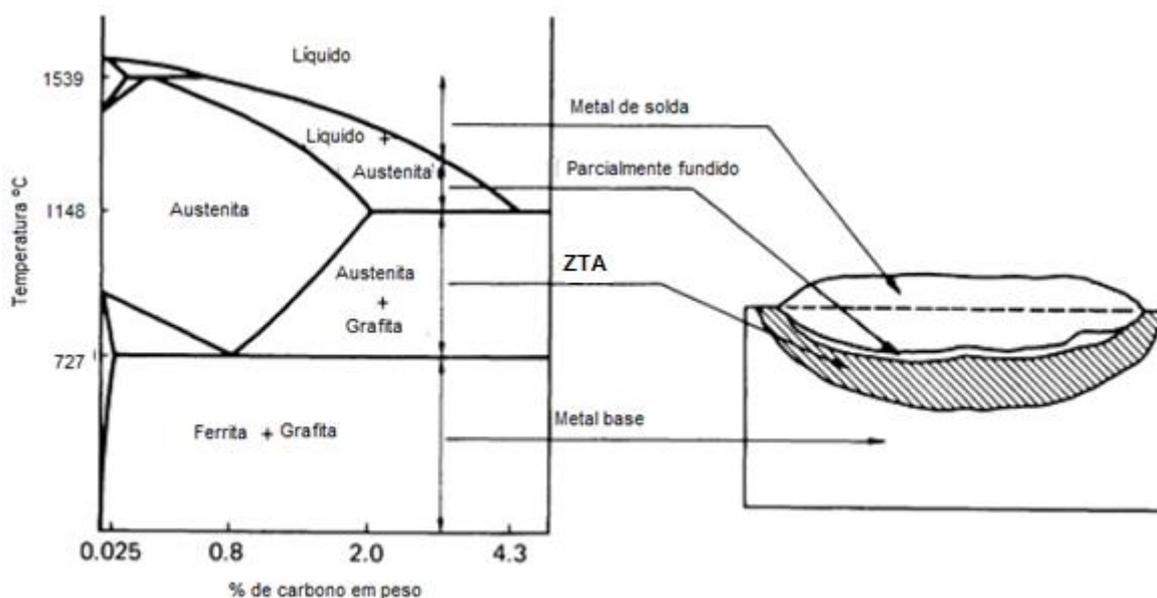
- procedimentos que fornecem um metal depositado de composição similar ao metal base (ferro fundido);
- procedimentos que fornecem um metal depositado de aços ou ligas com um elevado teor de metais não ferrosos (cobre/níquel).

O primeiro método é usado principalmente para reparar defeitos em peças fundidas e utiliza um pré-aquecimento de 300 a 700° C e, em geral, um tratamento térmico após a soldagem. Durante a soldagem, forma-se uma grande poça de fusão, favorecendo a remoção de gases e inclusões não metálicas na zona fundida. O resfriamento da solda é mantido bem lento (não mais do que 50-100°C/h) dificultando a formação de ledeburita e de martensita na ZF e ZTA. Os principais processos de soldagem usados neste tipo de procedimento são OFW, SMAW e FCAW.

No segundo método, a soldagem é, em geral, feita sem pré-aquecimento ou com um pré-aquecimento mínimo, com a deposição de passes curtos e espaçados e com uma baixa energia de soldagem de modo a minimizar a extensão das regiões afetadas pela soldagem. Martelamento (da solda) pode ser, em alguns casos, usado para reduzir o nível das tensões residuais. Eletrodos podem ser de metais não ferrosos (ligas de níquel ou de cobre) ou de aço. No primeiro caso, o material não dissolve o carbono nem forma carbonetos, mantendo a ZF dúctil e com baixa dureza. Eletrodos de aço podem ser de aço inoxidável austenítico ou de aços especiais com elevado teor de elementos formadores de carbonetos. Neste caso, o depósito tende a ter uma dureza mais elevada, não sendo em geral, usinável. O método é usualmente realizado com o processo SMAW (MODENESI, 2008B).

Durante a soldagem de um material metálico, uma variação de gradiente térmico é verificada tanto no metal de solda como na zona termicamente afetada (ZTA) do metal. Isto resulta em diferentes microestruturas e propriedades. As várias microestruturas podem ser classificadas dentro de diferentes zonas e regiões, como mostrado na Figura 3.25 (ASM HANDBOOK, 1993).

Figura 3.25 – Representação esquemática das zonas de temperaturas em soldagem típica do ferro fundido.



Fonte: ASM HANDBOOK, 1993.

A natureza e tamanho relativo destas zonas serão determinados pelo calor gerado durante a soldagem, a composição do ferro fundido que será soldado e do metal de adição utilizado (ASM HANDBOOK, 1993).

Zona Termicamente Afetada (ZTA).

O processo de soldagem pela sua natureza é caracterizado pelo resfriamento rápido quando comparado ao processo de fundição. Conseqüentemente, as propriedades da solda, bem como as seções do metal de base expostas a estas temperaturas, conhecida como zona afetada pelo calor ou zona termicamente afetada, podem ser diferentes do restante do material. Considerando as ligas ferrosas, durante a soldagem, o carbono pode se difundir na austenita. Quando ocorre o resfriamento, esta austenita se transforma em martensita, que é muito frágil e suscetível a trincas. A quantidade da martensita formada depende da composição química e do histórico térmico do processo, dentre outros fatores. A estrutura martensítica frágil pode ser modificada por revenimento, usando pré aquecimento e empregando controle de temperatura entre passes, em soldas passes múltiplos, ou por um tratamento térmico pós-soldagem.

Região Parcialmente Fundida.

É uma extensão da ZTA, ocorrendo quando um alto pico de temperatura causa uma fusão parcial das impurezas de baixo ponto de fusão contidas no metal de base, próximo a linha de fusão. Esta é a zona mais crítica na solda, porque no resfriamento, esta área resfria como ferro fundido branco (isto é, quando mantido a altas temperaturas em tempo suficiente para a dissolução do carbono) devido a altas taxas de resfriamento. A região é muito complexa e pode conter diferentes tipos de microestrutura. Se a quantidade de grafita dissolvida durante a soldagem é suficientemente alta e forma uma matriz fundida contínua, é igual aquela da rede de carbono também será contínua, conduzindo a problemas. Devido à região parcialmente fundida conter uma grande proporção de produtos frágeis, é a zona de maior dureza da solda. A alta dureza e a baixa ductilidade resultante torna esta região a responsável pela maioria dos problemas mecânicos sofridos na soldagem do ferro fundido. A maneira mais efetiva de reduzir a severidade do problema de trincas é reduzir a temperatura de pico e a redução da permanência a altas temperaturas. Isto pode ser controlado através da temperatura de entrada, pré aquecimento, temperatura entre passes e seleção do material de adição apropriado. O uso de metal de adição de baixo ponto de fusão ajudará a reduzir a temperatura de pico experimentada na região parcialmente refundida. Entretanto, se a solda é suficientemente pequena e um alto aporte de calor foi usado, a temperatura do metal de base possa ser elevada o suficiente para causar a rápida fusão, problemas críticos na linha de fusão mesmo não havendo pré-aquecimento. Se, por outro lado, uma alta temperatura de pré-aquecimento foi usada para prevenir a formação de martensita na ZTA e reduzir tensões, trincas na linha de fusão podem ocorrer mesmo com baixa entrada de calor. Testes podem ser necessários na tentativa de se estabelecer um procedimento correto. Um procedimento de soldagem que possa controlar a região parcialmente fundida e a ZTA produzirá uma solda sem defeitos.

Zona Fundida.

As propriedades e microestrutura da zona fundida são ditadas pelo consumível usado na soldagem. Esta área é formada pelo metal de adição e alguma diluição do ferro fundido. Devido à turbulência da poça de fusão, o depósito de solda tem uma composição relativamente uniforme. Todo esforço deve ser feito para minimizar a diluição, definida como a participação relativa do metal de base em todo o metal de

solda. A diluição pode ser diminuída pela diminuição da energia de soldagem ou pela utilização de um metal de adição de menor ponto de fusão. Ressalta-se que a diluição é.

Diversos fatores afetam a capacidade de se obter uma solda sem defeitos nos ferros fundidos, dentre os quais podem ser mencionados a seleção do metal de adição, martelamento, entrada de calor, contaminantes locais, inclusões de areia e lubrificantes absorvidos pelo ferro fundido (ASM HANDBOOK, 1993). No entanto, o pré-aquecimento representa uma das mais importantes considerações na soldagem dos ferros fundidos, diminuindo a velocidade de resfriamento e, conseqüentemente:

- prevenindo trincas causadas por gradientes de temperatura;
- reduzindo tensões residuais no metal de solda;
- reduzindo distorções;
- reduzindo a dureza na ZTA;
- reduzindo gradientes de temperatura quando soldando metais de base distintos;
- reduzindo hidrocarbonetos contaminantes em soldas executadas em materiais em serviço (os contaminantes são queimados).

A temperatura de pré-aquecimento do ferro fundido é discutível, tendo como o seguinte um guia geral (ASM HANDBOOK, 1993):

- quanto maior o carbono equivalente, maior a temperatura de pré-aquecimento;
- se o tipo de ferro fundido é conhecido mas não a composição química específica, então o pré-aquecimento deverá ser baseado na microestrutura e na resistência mecânica do fundido;
- ferros fundidos de baixa resistência usualmente requerem menores temperatura de pré-aquecimento do que de ferros fundidos de alta resistência.

Em geral, o uso do processo GMAW na soldagem dos ferros fundidos é considerado limitado, sendo suas principais vantagens as altas taxas de deposição e eficiência (PARIS, 2003). Dos tipos de transferência obtidos neste processo, a mais indicada é a “curto-circuito” ocasionando baixa diluição do metal de base. Por causa do pequeno tempo disponível para a difusão do carbono e silício entre o metal base e de deposição, os carbonetos são descontínuos.

Por outro lado, Santana et al. (2012), utilizando o processo GMAW, concluíram ser este processo uma opção para a soldagem do ferro fundido nodular, possibilitando após a definição dos parâmetros de soldagem adequados, repetibilidade, fácil mecanização ou automatização e obtenção de cordões com morfologia e microestruturas que podem ser ajustadas às condições específicas e desejadas.

Na soldagem dos ferros fundidos com eletrodos revestidos, estes são classificados pela norma AWS A5.15 (PARIS, 2003). A nomenclatura dos eletrodos inicia-se sempre com a letra E, que significa eletrodo, seguida pelo tipo de material que compõe a alma metálica. Por exemplo, CI do inglês, significando *cast iron* (ou ferro fundido); St, *steel* (ou aço); Ni, níquel puro; Fe-Ni, liga de ferro e níquel, dentre outros.

Segundo MACHADO (1996), os eletrodos para a soldagem dos ferros fundidos podem ser apresentados em grupos, conforme descrito a seguir.

- Ferro fundido: a alma desse eletrodo revestido é de ferro fundido (3,5% C; 3% Si; 0,70% Mn; 0,60% P), sendo designado ECI. A escória é relativamente fina, apesar do revestimento ser espesso. Dependendo do porte da peça, pode ser necessário pré-aquecer a mesma entre 200°C e 650°C, com o propósito da dureza do depósito não ultrapassar 200HB.

- Ligas de níquel: com esses consumíveis, desde que seja pequena a diluição, as soldas realizadas sem pré-aquecimento são usináveis. Uma única camada pode resultar em durezas tão altas quanto 350 HB, enquanto multi-camadas devidamente controladas apresentam de 175 a 200 HB. Os seguintes eletrodos compõem esse grupo: ENi-CI, ENiFe-CI, ENiFe-CI-A, ENiFeMn-CI, ENiCu-A e ENiCu-B.

a) ENi-CI: eletrodo com alma de níquel puro. Esse eletrodo é utilizado na reconstituição e reparo de fundidos, além de na união dos mesmos com outras ligas ferrosas. Soldas de união podem ser realizadas sobre juntas não muito tensionadas, ou quando o metal de base apresentar baixo teor de fósforo. O metal de solda apresenta relativamente baixa resistência e ductilidade, sendo esse eletrodo somente empregado quando há necessidade máxima usinabilidade. Caso contrário o eletrodo ENiFe-CI abaixo descrito deve ser preferido.

b) ENiFe-CI: eletrodo com alma de ferro-níquel. Estes eletrodos são utilizados em situações similares ao anterior (ENi-CI). Além de serem mais baratos, os mesmos devem ser preferidos na soldagem do ferro fundido nodular; ferros fundidos com teor de fósforo acima de 0,20%; seções altamente estrangidas e ferros fundidos de alta resistência mecânica.

c) ENiFe-CI-A: similar ao ENiFe-CI, mas com maior teor de alumínio no revestimento (até 3%). Enquanto este elemento pode melhorar as características da escória, o mesmo também reduz a ductilidade do metal de solda.

d) ENiFeMn-CI: esse eletrodo deposita um metal de solda com até 14% de manganês, o que pode ser benéfico para sua fluidez e propriedades mecânicas. Portanto, esse consumível pode ser empregado na união de ferros fundidos nodulares de alta resistência mecânica e como revestimento protetor ao desgaste.

E) ENiCu-A e ENiCu-B: o primeiro tipo pode conter até 45% Cu, enquanto o segundo 35% Cu. Esses consumíveis devem ser empregados de modo a produzir pequena diluição, pois caso contrário se formam trincas no metal de solda. As aplicações são similares àquelas recomendadas para o ENiFe-CI, ENiFe-CI-A e ENiFeMn-CI.

El-Banna et al. (2000), utilizando o processo SMAW, empregaram eletrodos diversos para a soldagem do ferro fundido nodular, como ENi-CI, ENiFe-CI, ENiCu e E308L-16. Este último, de aço inoxidável, pode ser usado, já que apresenta alta resistência a trincas, atribuídas à alta proporção de ferrita δ intergranular, a qual fornece locais de precipitação preferenciais para as impurezas dissolvidas e certos elementos fundidos do metal de base.

Pascual et al. (2009) estudaram a soldabilidade do ferro fundido nodular usando eletrodos ENi-CI, ENiFe-CI, chegando às seguintes conclusões:

- eletrodos de alta pureza de Ni mostraram melhor soldabilidade do que eletrodos de Ni-Fe, em virtude do aumento da ductilidade devido à baixa quantidade de estrutura acicular formada e à melhor distribuição uniforme da grafita no cordão;
- o pré-aquecimento aumenta a ductilidade da peça soldada através da minimização de estruturas duras e frágeis;
- um recozimento pode ser empregado aumentando também a ductilidade.

4. METODOLOGIA

4.1. Descrição Geral do Trabalho Realizado

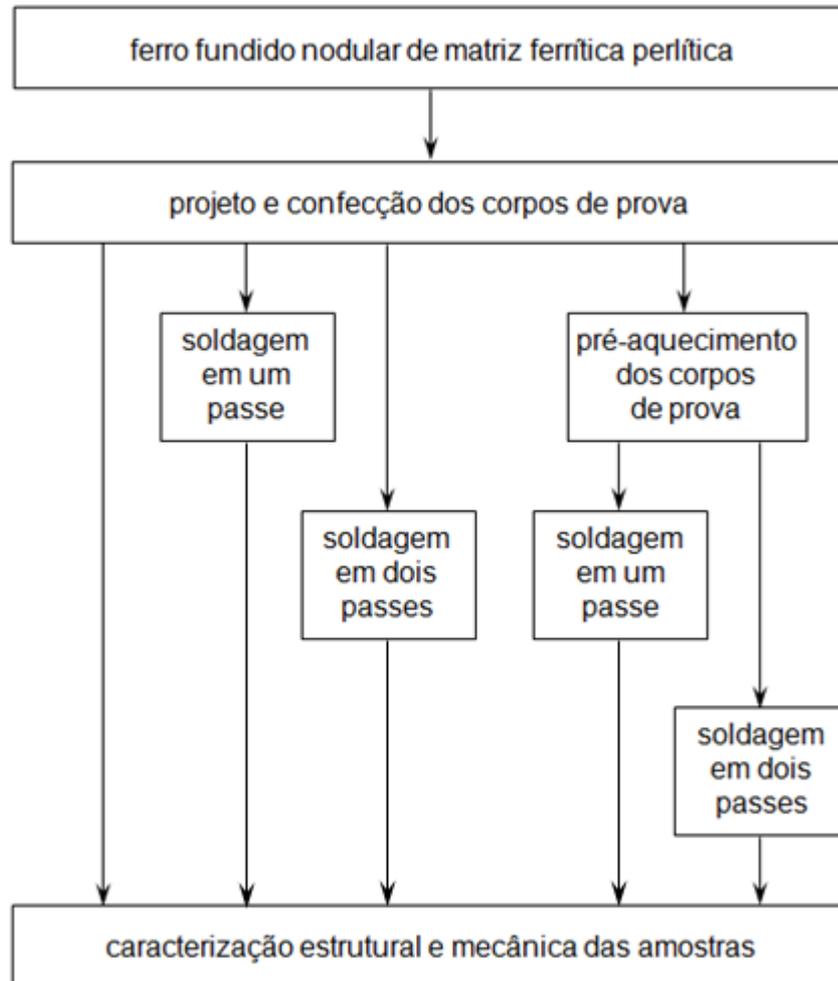
O trabalho de pesquisa desenvolvido foi essencialmente experimental, envolvendo a deposição de cordões de solda sobre amostras de ferro fundido nodular utilizando o processo SMAW (Shielded Metal Arc Welding – soldagem ao arco com eletrodo revestido).

Foram empregadas diferentes condições soldagem, compreendendo a realização de deposição dos cordões em corpos de prova sem pré-aquecimento e com pré-aquecimento em diferentes temperaturas. Em adição à avaliação da influência do estado inicial do material, foram observados também os efeitos da utilização de dois eletrodos de composições químicas distintas e da realização da operação em um ou dois passes.

Os efeitos das condições mencionadas anteriormente foram verificados por meio da análise de propriedade mecânica e da estrutura do material após a soldagem. Em relação à propriedade mecânica, foram avaliadas as distribuições de microdureza ao longo da seção transversal dos corpos de prova soldados. Em relação às características estruturais do material, a análise foi realizada empregando as técnicas metalográficas, possibilitando a observação da macroestrutura, ou seja, da zona fundida, da zona termicamente afetada e do metal de base; e da microestrutura, essa última por microscopia óptica, levando à avaliação dos microconstituintes formados no processo.

O fluxograma do procedimento experimental do trabalho é apresentado na Figura 4.1, no qual podem ser observadas as etapas de projeto e confecção dos corpos de prova, caracterização estrutural e mecânica do material no estado inicial, realização do processo de soldagem sem pré-aquecimento em um ou dois passes, caracterização estrutural e mecânica do material soldado, pré-aquecimento dos corpos de prova, realização do processo de soldagem com pré-aquecimento e caracterização estrutural e mecânica do material desses corpos de prova soldados.

Figura 4.1 – Fluxograma das atividades experimentais desenvolvidas no trabalho.



Fonte: Produzido pelo autor.

4.2. Material

O material utilizado no trabalho foi um ferro fundido nodular com matriz ferrítica perlítica, cuja composição química (% em peso), fornecida pelo fabricante (Fundição Tupy), é apresentada na Tabela 4.1. O material foi fabricado por fundição contínua, adquirido na forma de barras com seção transversal de 63,5mm x 63,5mm.

Tabela 4.1 – Composição química (% em peso) fornecida pelo fabricante do ferro fundido nodular utilizado no trabalho.

elemento	C	Si	Mg	Mn	S	P	Cu	Cr
% em peso	3,90	2,96	0,05	0,20	0,014	0,063	0,015	0,038

Fonte: Fundição Tupy.

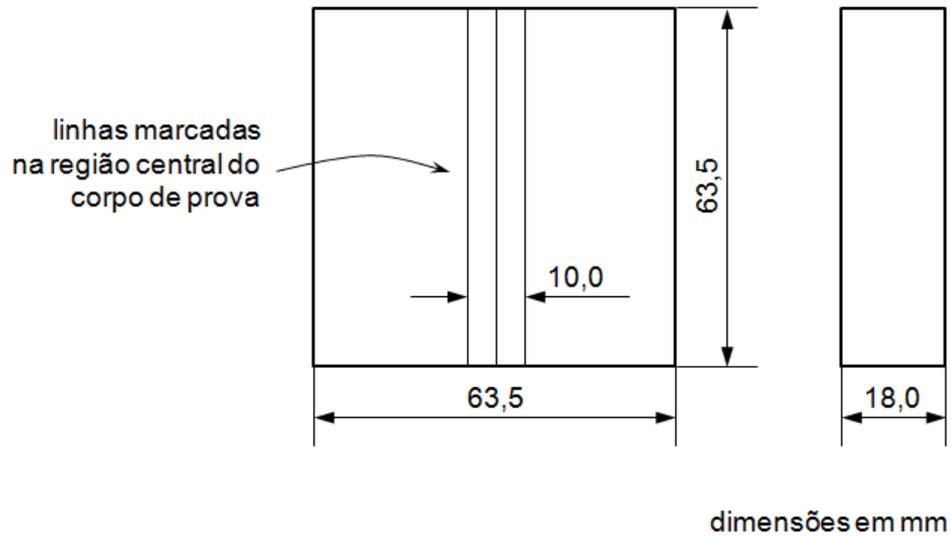
Ainda de acordo com o fabricante, a grafita em nódulos presente no ferro fundido apresenta forma I-II, considerando a norma ASTM A 247-67 (1998), conforme a Figura 3.12, com 95% de nodularização.

4.3. Corpos de Prova

A representação esquemática e a imagem, como exemplo, de um dos corpos de prova empregados na operação de soldagem do ferro fundido nodular são apresentadas nas Figuras 4.2 e 4.3. Neste caso, as peças foram confeccionadas por operações de corte, em uma serra de fita marca *Franho* modelo FM1600, e faceamento, em um torno mecânico marca *Nardini* modelo micro 500II. Pode ser verificado que, com exceção da espessura, as demais dimensões dos corpos de prova foram as das barras de ferro fundido como adquiridas. Observa-se ainda que na superfície foram produzidas três linhas com um traçador de altura marca *FWP* modelo MAR a250, uma central e duas eqüidistantes da primeira em 5mm, formando uma faixa de 10mm de largura no total. Esse procedimento foi realizado com o objetivo de facilitar o alinhamento do cordão durante a operação de soldagem.

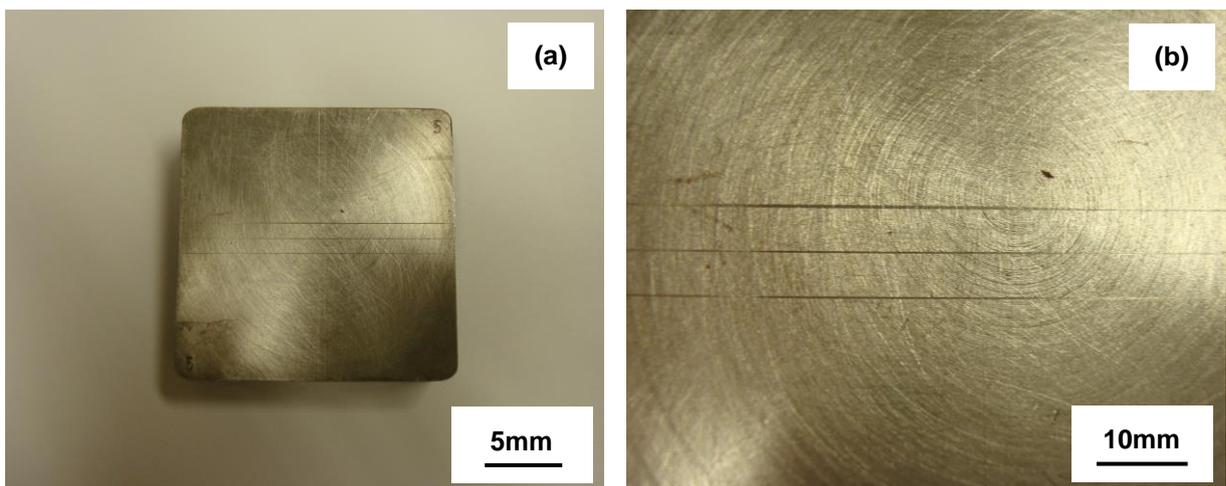
Na Tabela 4.2 são exibidos os resultados de controle dimensional da espessura dos vinte e quatro corpos de prova confeccionados para o trabalho, obtidos por meio de um paquímetro digital marca *Starrett* modelo 799A-8/200, acompanhados do valor médio e de seu desvio padrão. Especial atenção foi dada a esse aspecto para não levar a um ciclo aquecimento/resfriamento distinto nas peças em função de diferentes volumes iniciais de material.

Figura 4.2 – Representação esquemática do corpo de prova de ferro fundido nodular utilizado no processo de soldagem.



Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 4.3 – Imagem, apresentada como exemplo, de um dos corpos de prova de ferro fundido nodular utilizados no trabalho.



(a) Corpo de prova e (b) Detalhe das linhas marcadas.

Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 4.2 – Espessura dos corpos de prova de ferro fundido nodular confeccionados para o trabalho – valores individuais e médio.

corpo de prova	espessura (mm)
1	18,25
2	18,15
3	18,16
4	18,23
5	18,08
6	18,10
7	18,12
8	18,12
9	18,31
10	18,17
11	18,05
12	18,27
13	18,08
14	18,18
15	18,10
16	18,30
17	18,00
18	18,16
19	18,06
20	18,12
21	18,18
22	18,07
23	18,18
24	18,25
valor médio	18,15 ± 0,08

Fonte: Produzido pelo autor.

4.3. Pré-Aquecimento dos Corpos de Prova

As operações de pré-aquecimento dos corpos de prova a serem submetidos à deposição de cordões de solda foram realizadas em dois fornos elétricos, da marcas *Brasimet* e *Magnus*, o primeiro com sistema de controle de temperaturas analógico e o segundo com sistema de controle digital. Foram empregados dois fornos para facilitar a operação de soldagem em temperaturas de pré-aquecimento dos corpos de prova distintas. A verificação das temperaturas de pré-aquecimento foi conduzida em um termômetro infravermelho marca *Minipa* modelo MT-390.

Na Tabela 4.3 são apresentados os parâmetros de pré-aquecimento utilizados no trabalho. Verifica-se que são quatro condições, envolvendo quatro temperaturas e um único tempo. Em adição às condições mostradas na Tabela 4.3, como mencionado na descrição geral exibida anteriormente, o material sem pré-aquecimento também foi analisado.

Tabela 4.3 – Parâmetros de pré-aquecimento utilizados no trabalho.

temperaturas	tempo
100°C, 200°C, 300°C e 400°C	1800s

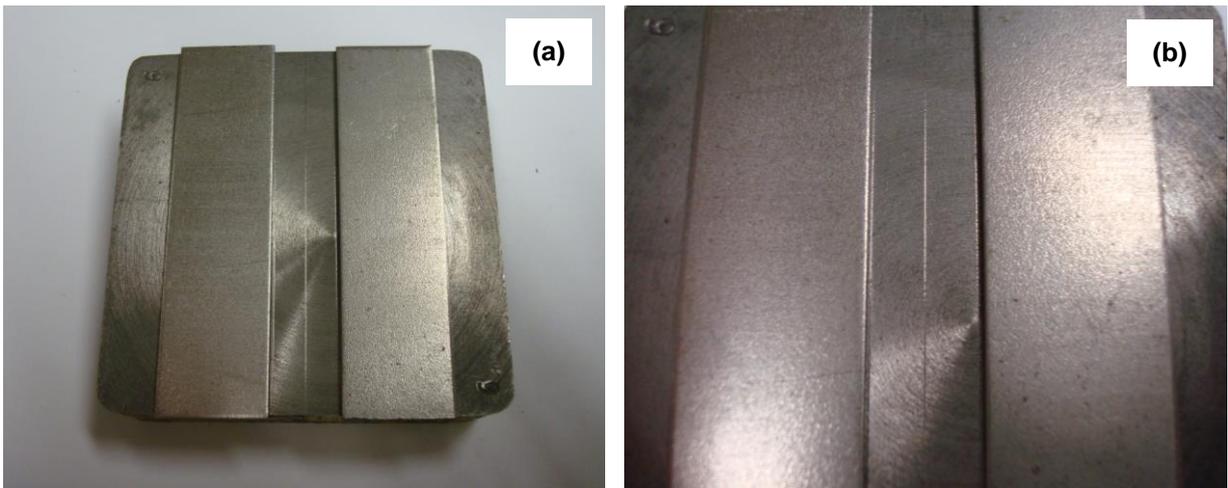
Fonte: Produzido pelo autor.

4.4. Processo de Soldagem

A soldagem do ferro fundido nodular foi realizada através do processo a arco com eletrodo revestido (SMAW), com deposição de cordões sobre os corpos de prova, em um e dois passes. Os experimentos foram conduzidos com um transformador retificador da marca *White Martins* modelo Soldac R-250, tipo corrente constante. Foram empregados dois tipos de eletrodos na análise, da marca *Eutectic Castolin*, ambos com 3,2mm de diâmetro. O primeiro apresentou alma de ferro e níquel, classe AWS ENiFe-CI, denominado no trabalho eletrodo FeNi, e o segundo exibiu alma de níquel puro, classe AWS ENi-CI, denominado no trabalho eletrodo Ni.

Na Figura 4.4 são mostradas, como exemplo, imagens de um dos corpos de prova, preparado para a realização da deposição do cordão de solda (neste caso, sem pré-aquecimento e em apenas um passe). Observa-se que na porção central da peça foram colocadas duas chapas de aço, coincidindo com as linhas marcadas anteriormente com o traçador de altura. Este procedimento foi conduzido em todos os corpos de prova, de forma a facilitar a obtenção de cordões de solda na mesma região e relativamente alinhados. No caso da deposição de cordão em dois passes, as chapas auxiliares foram empregadas apenas na primeira etapa.

Figura 4.4 – Imagem de um dos corpos de prova preparados para a deposição de cordões por soldagem.



(a) Corpo de prova com as chapas posicionadas para soldagem e (b) Detalhe das chapas.

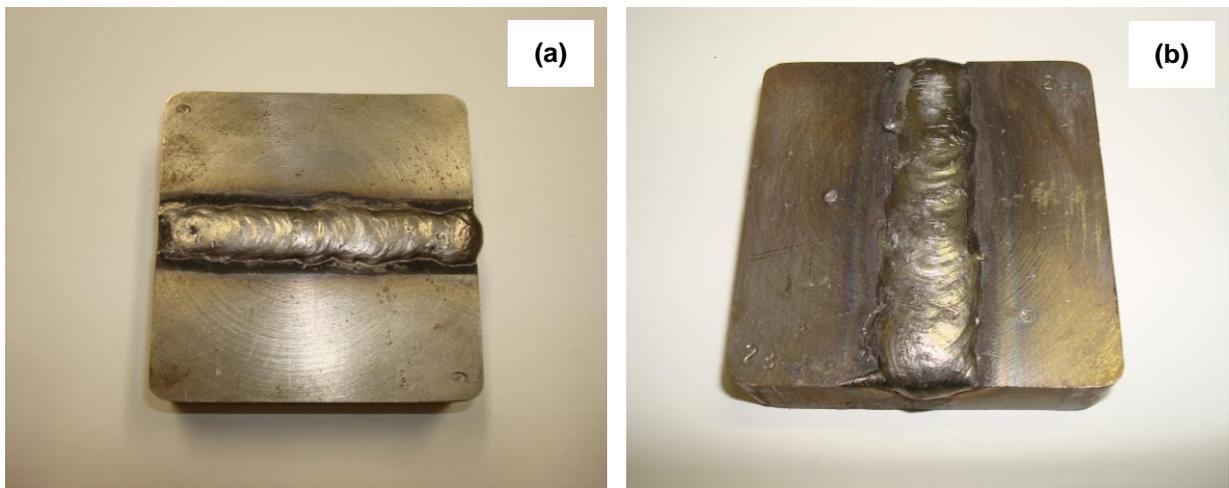
Fonte: Produzido pelo autor.

Na Figura 4.5 são apresentadas imagens, como exemplos, de dois corpos de prova de ferro fundido nodular (sem pré-aquecimento) após a deposição dos cordões de solda em um passe e em dois passes.

Os parâmetros de corrente (corrente contínua) foram escolhidos, a princípio, de acordo com a especificação do fabricante. Neste caso, tanto para o eletrodo com alma de níquel puro como para o eletrodo com alma de ferro níquel, a faixa recomendada era 90A – 110A para o diâmetro de 3,2mm (EUTETIC CASTOLIN,

2009). Dessa forma, após a preparação adequada dos equipamentos, durante os experimentos os valores de corrente foram observados e nas Tabelas 4.4 a 4.7 são mostrados os resultados médios (oriundos de aproximadamente 12 observações) acompanhados do desvio padrão para o material soldado em um e dois passes com os dois tipos de eletrodo investigados.

Figura 4.5 – Imagens, como exemplos, de corpos de prova após a deposição de cordão em um e dois passes.



(a) Corpo de prova soldado em um passe e (b) Corpo de prova soldado em dois passes.

Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 4.4 – Valores de corrente médios acompanhados de desvio padrão observados na soldagem em um passe do ferro fundido nodular com eletrodo FeNi.

condição	soldagem realizada em um passe – corrente (A)
sem pré-aquecimento	110 ± 7
pré-aquecimento 100°C	106 ± 5
pré-aquecimento 200°C	111 ± 5
pré-aquecimento 300°C	107 ± 6
pré-aquecimento 400°C	108 ± 6

Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 4.5 – Valores de corrente médios acompanhados de desvio padrão observados na soldagem em dois passes do ferro fundido nodular com eletrodo FeNi.

condição	deposição do primeiro cordão – corrente (A)	deposição do segundo cordão – corrente (A)
sem pré-aquecimento	111 ± 5	114 ± 6
pré-aquecimento 100°C	118 ± 5	120 ± 3
pré-aquecimento 200°C	119 ± 4	115 ± 4
pré-aquecimento 300°C	115 ± 5	114 ± 4
pré-aquecimento 400°C	115 ± 4	115 ± 3

Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 4.6 – Valores de corrente médios acompanhados de desvio padrão observados na soldagem em um passe do ferro fundido nodular com eletrodo Ni.

condição	soldagem realizada em um passe – corrente (A)
sem pré-aquecimento	106 ± 4
pré-aquecimento 100°C	101 ± 5
pré-aquecimento 200°C	105 ± 4
pré-aquecimento 300°C	106 ± 5
pré-aquecimento 400°C	106 ± 3

Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 4.7 – Valores de corrente médios acompanhados de desvio padrão observados na soldagem em dois passes do ferro fundido nodular com eletrodo Ni.

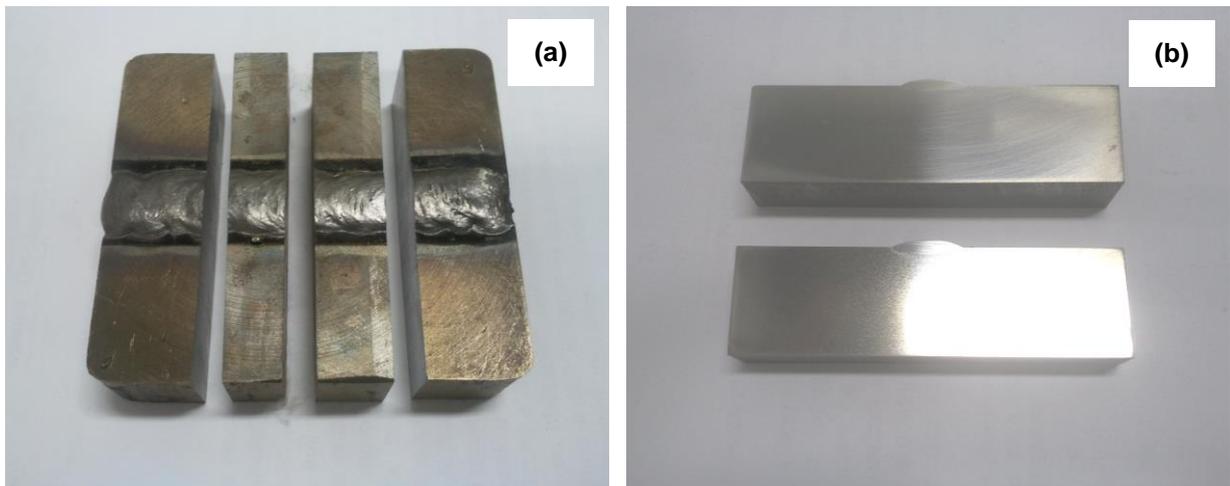
condição	deposição do primeiro cordão – corrente (A)	deposição do segundo cordão – corrente (A)
sem pré-aquecimento	121 ± 2	125 ± 2
pré-aquecimento 100°C	126 ± 3	120 ± 2
pré-aquecimento 200°C	126 ± 2	123 ± 3
pré-aquecimento 300°C	114 ± 3	114 ± 3
pré-aquecimento 400°C	117 ± 3	112 ± 6

Fonte: Produzido pelo autor.

4.5. Caracterização Macro e Microestrutural do Material Soldado

A primeira etapa da caracterização macro e microestrutural do ferro fundido nodular após a deposição do cordão de solda consistiu no corte e preparação de duas amostras de cada um dos corpos de prova soldados nas 20 condições analisadas no trabalho (um e dois passes, dois eletrodos e sem pré-aquecimento e com pré-aquecimento considerando quatro temperaturas). A operação foi realizada em uma máquina de corte com disco abrasivo da marca *Struers*, na presença de fluido lubrificante e refrigerante. Na Figura 4.6 podem ser observadas imagens, como exemplo, de um corpo de prova soldado em um passe após o corte e as amostras obtidas a partir deste.

Figura 4.6 – Imagens, como exemplo, da etapa inicial de preparação de amostras para a caracterização do ferro fundido nodular após a deposição de cordão de solda.



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

Fonte: Produzido pelo autor.

Após a obtenção das amostras, foi conduzida a preparação para a análise macrográfica, seguindo a técnica metalográfica convencional, consistindo em lixamento em lixadeiras elétricas da marca *Struers* com lixas de granulometrias distintas (#120, #240, #320, #400 e #600) e ataque químico por imersão com reagente Nital 10%. Em seguida, as amostras foram digitalizadas em uma impressora/scanner multifuncional da marca *Hewlett Packard* modelo 1610, de forma

a possibilitar a observação da zona fundida e da possível zona termicamente afetada no material. Essa avaliação foi conduzida nas duas amostras de todas as condições de soldagem investigadas no trabalho.

A caracterização microestrutural do ferro fundido nodular foi realizada posteriormente ao exame macroestrutural, novamente envolvendo o procedimento metalográfico usual: corte com disco abrasivo em uma máquina da marca *Struers*, com fluido lubrificante e refrigerante (neste caso representando apenas uma redução na largura da peça, ou seja, corte de uma parte do metal de base das laterais), embutimento a frio com acrílico autopolimerizante, lixamento em lixadeiras elétricas da marca *Struers* com lixas de granulometrias distintas (#240, #320, #400, #600 e #1200) e polimento em politrizes da marca *Arotec*, com pasta de diamante com granulometrias de 9 μ m, 3 μ m e 1 μ m. O reagente químico utilizado foi o Nital 3%. Na Tabela 4.8 podem ser verificadas as composições dos reagentes empregados tanto para a análise macrográfica como para a avaliação micrográfica das peças.

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

denominação	composição
Nital 10%	10ml de ácido nítrico, 90ml de álcool etílico PA
Nital 3%	3ml de ácido nítrico, 97ml de álcool etílico PA

Fonte: Adaptado de COLPAERT, 2008.

Após a preparação, a microestrutura das amostras foi analisada por microcopia óptica (MO), empregando um microscópio da marca *Fortel*, com sistema de digitalização de imagens da marca *Kontrol*. Nesta etapa, foram avaliadas as condições sem pré-aquecimento e com pré-aquecimento a 200°C e a 400°C, para os corpos de prova soldados com os dois eletrodos investigados no trabalho.

Similarmente ao ferro fundido nodular após a deposição dos cordões de solda nas diversas condições, duas amostras do material no estado inicial, como adquirido,

foram caracterizadas por meio de microscopia óptica, com o objetivo de confirmar as informações do catálogo do fabricante e possibilitar a comparação com a liga ferrosa após a operação de soldagem.

4.6. Ensaios de Dureza

A avaliação das propriedades do ferro fundido nodular soldado nas diversas condições foi realizada por meio de ensaios de microdureza Vickers, conduzidos em um microdurômetro da marca *Shimadzu* modelo HM 2T, com dois micrômetros digitais da marca *Mitutoyo* acoplados, empregando carga de 0,3kgf (300gf) e tempo de aplicação de 15 segundos.

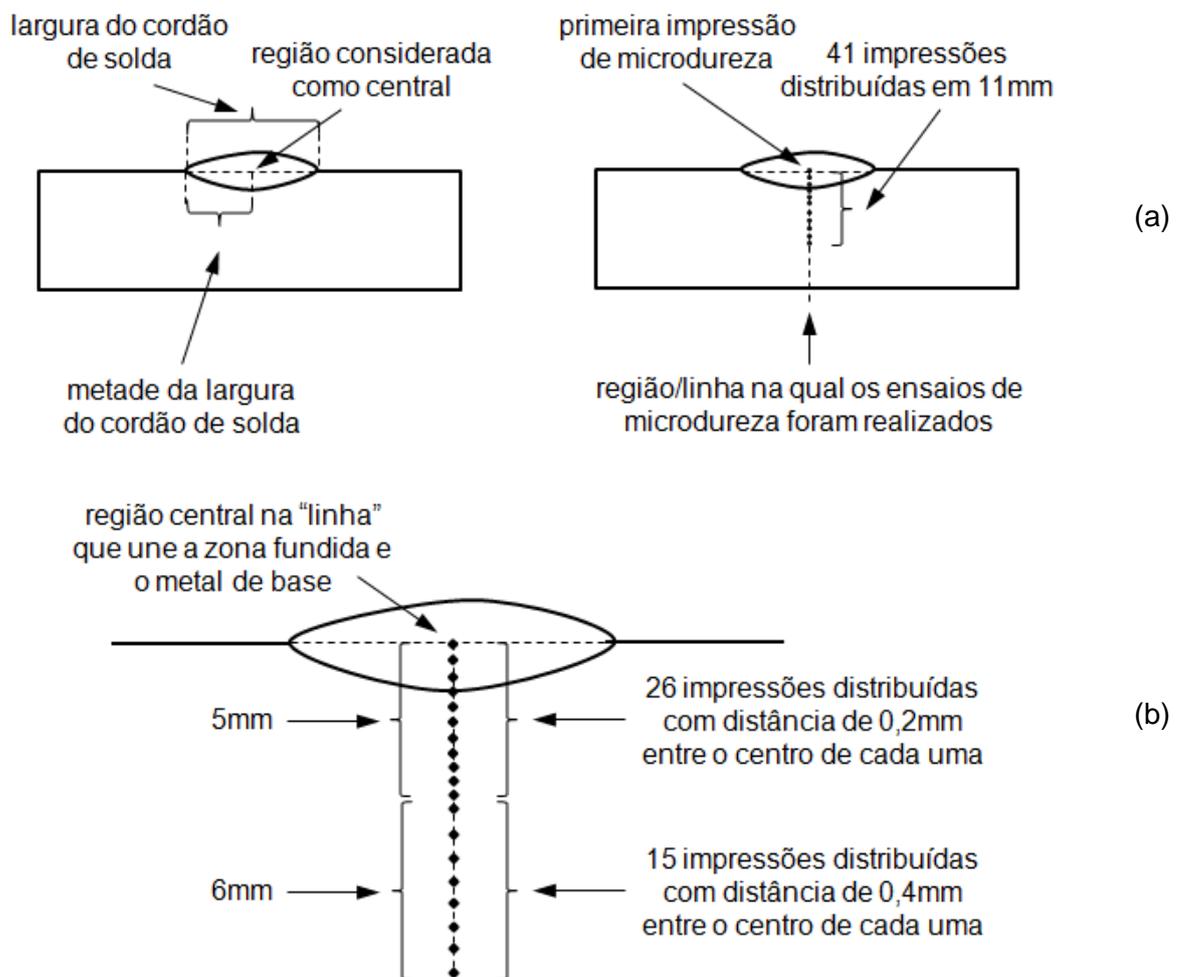
Os ensaios foram realizados no material (nas duas amostras de cada condição de soldagem abordada, portanto em 40 amostras) após a análise macrográfica, tendo como preparação apenas o lixamento com granulometria de #600, de forma a retirar a superfície afetada pelo ataque químico e facilitar a medição das dimensões da impressão. Após os ensaios, as amostras das condições escolhidas para a análise micrográfica foram conduzidas à preparação descrita no item anterior.

Os testes foram realizados ao longo da seção transversal das amostras soldadas, possibilitando a obtenção das distribuições ou perfis da propriedade mecânica no ferro fundido nodular após a deposição dos cordões de solda, envolvendo os resultados referentes à zona fundida, à zona termicamente afetada e ao metal de base. Na Figura 4.7 são mostradas representações esquemáticas do procedimento e localização das impressões. Inicialmente, após o posicionamento adequado da amostra, a largura do cordão de solda era determinada com o auxílio de um dos micrômetros do próprio equipamento e, a partir da mesma, a região central da linha considerada. Nessa região central era conduzido o primeiro dos ensaios de microdureza e os demais eram realizados abaixo da mesma, perpendicularmente à largura do cordão, constituindo 26 impressões distribuídas com distância de 0,2mm entre o centro de cada uma (5mm no total) e posteriormente 15 impressões com uma distância de 0,4mm entre o centro de cada uma (6mm no total), levando a um

total de 41 impressões de dureza e uma distância da região considerada como central de 11mm.

Por fim, assim como na análise da microestrutura, ensaios de dureza Vickers foram conduzidos em duas amostras do ferro fundido nodular no estado como adquiridos, com a realização de seis impressões em cada.

Figura 4.7 – Representações esquemáticas do procedimento e localização das impressões para a obtenção da distribuição da microdureza no ferro fundido nodular após a deposição dos cordões de solda.



(a) Determinação da largura do cordão de solda e da região considerada como central para a realização do primeiro dos 41 ensaios de microdureza e (b) Detalhamento dos ensaios de microdureza.

Fonte: Produzido pelo autor.

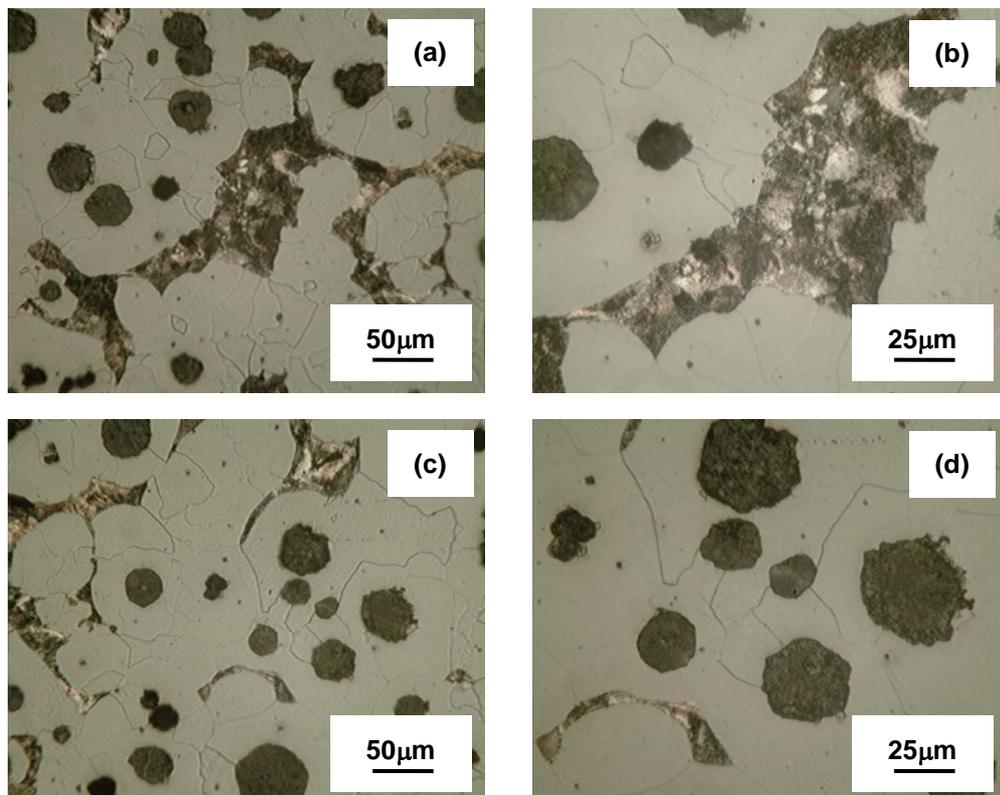
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização do Material no Estado Inicial

Na Figura 5.1 são apresentadas imagens obtidas por microscopia óptica de duas amostras do ferro fundido nodular como adquirido, no estado considerado inicial do trabalho. Verifica-se a presença dos nódulos de grafita na matriz ferrítica perlítica, com predominância do primeiro microconstituente na mesma.

Na Tabela 5.1 são mostrados os valores de dureza Vickers média de cada uma das amostras e o valor médio total.

Figura 5.1 – Fotomicrografias do ferro fundido nodular empregado no trabalho no estado como recebido.



(a) e (b) Amostra 1 e (c) e (d) Amostra 2 com ampliações distintas

Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 5.1 – Valores de dureza médios de duas amostras no estado inicial.

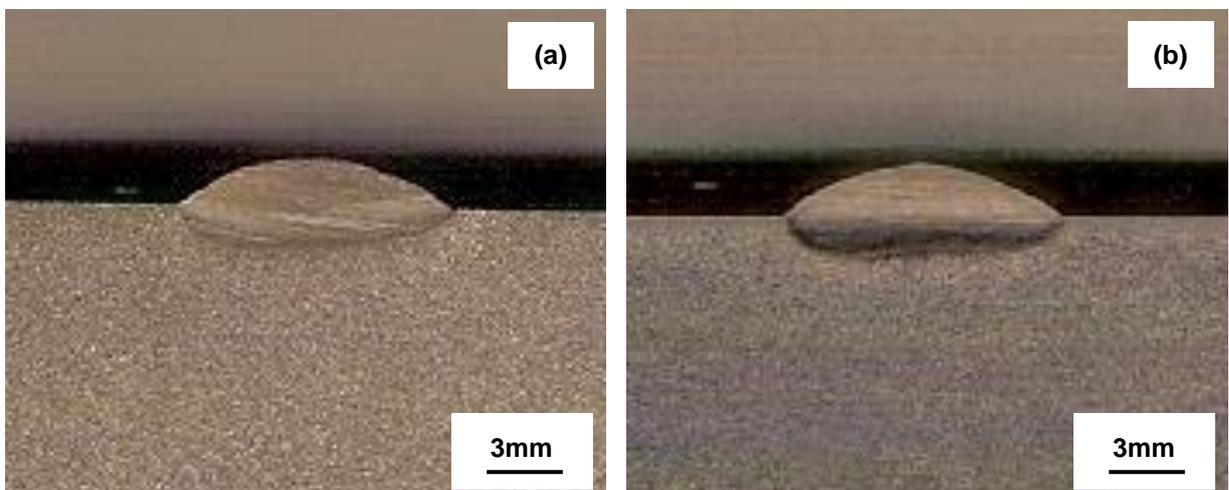
material recebido	dureza Vickers HV média
amostra 1	191
amostra 2	192
valor médio	191,5

Fonte: Produzido pelo autor.

5.2. Macrografia dos Corpos de Prova Soldados

Nas Figuras 5.2 a 5.6 são mostradas as macrografias do ferro fundido nodular soldado em um passe com eletrodo FeNi sem pré-aquecimento e com pré-aquecimento de 100°C a 400°C. A partir da observação das imagens, podem ser verificadas as zonas fundidas e as zonas termicamente afetadas nas amostras, essas últimas de forma discreta, tanto devido à suposta extensão, como devido ao contraste de cor com o metal de base. Entretanto, não é possível observar alterações significativas nas duas regiões mencionadas com o emprego do pré-aquecimento e alteração na temperatura do mesmo.

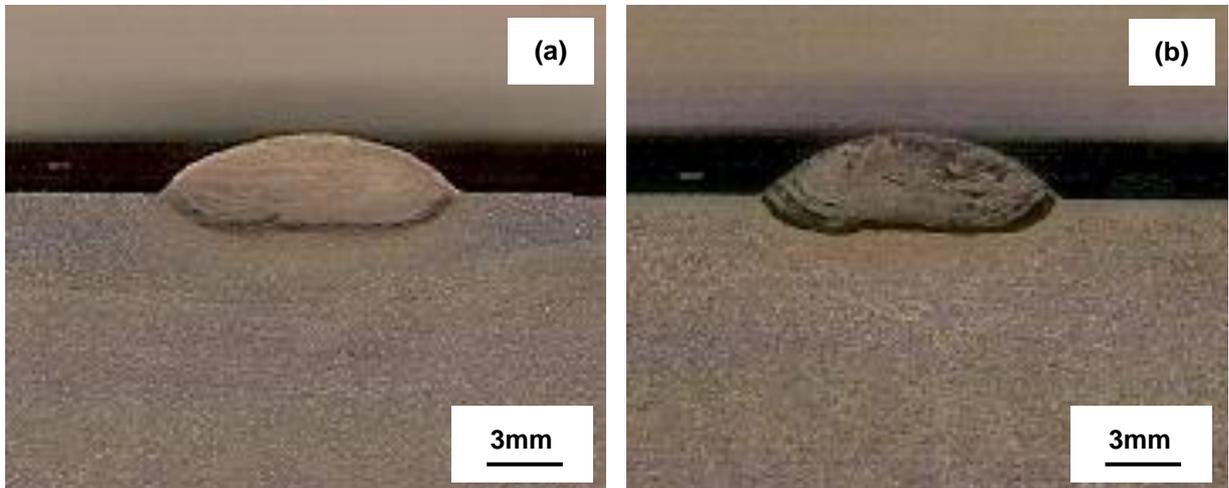
Figura 5.2 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi sem pré-aquecimento – corpo de prova soldado em um passe.



(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

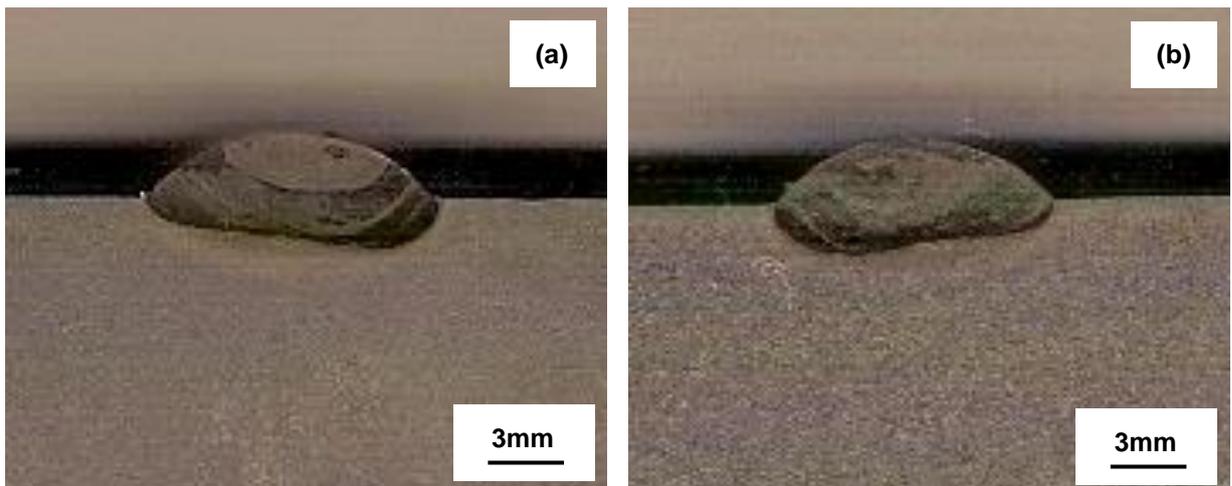
Figura 5.3 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi com pré-aquecimento de 100°C – corpo de prova soldado em um passe.



(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

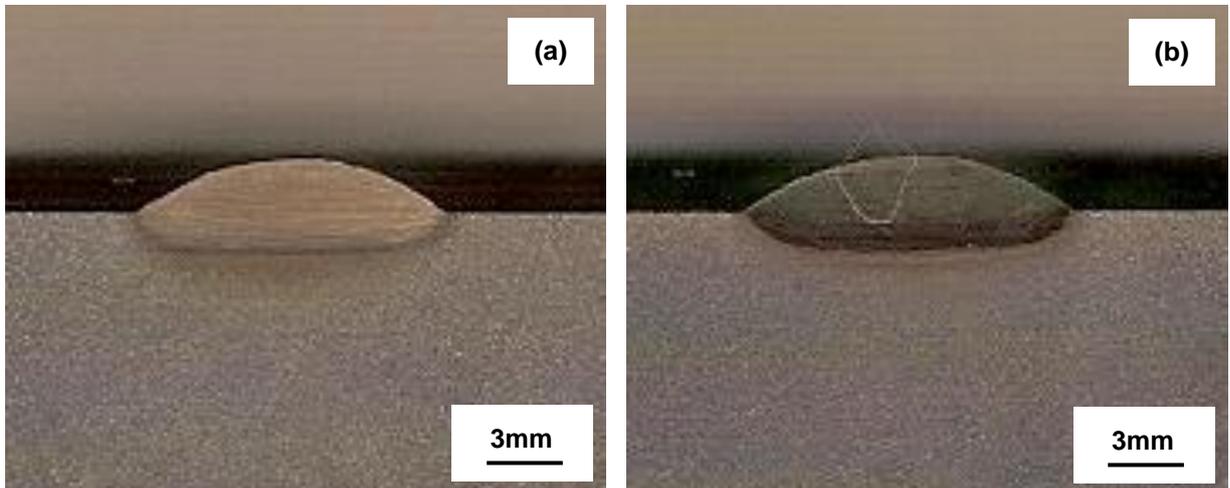
Figura 5.4 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi com pré-aquecimento de 200°C – corpo de prova soldado em um passe.



(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

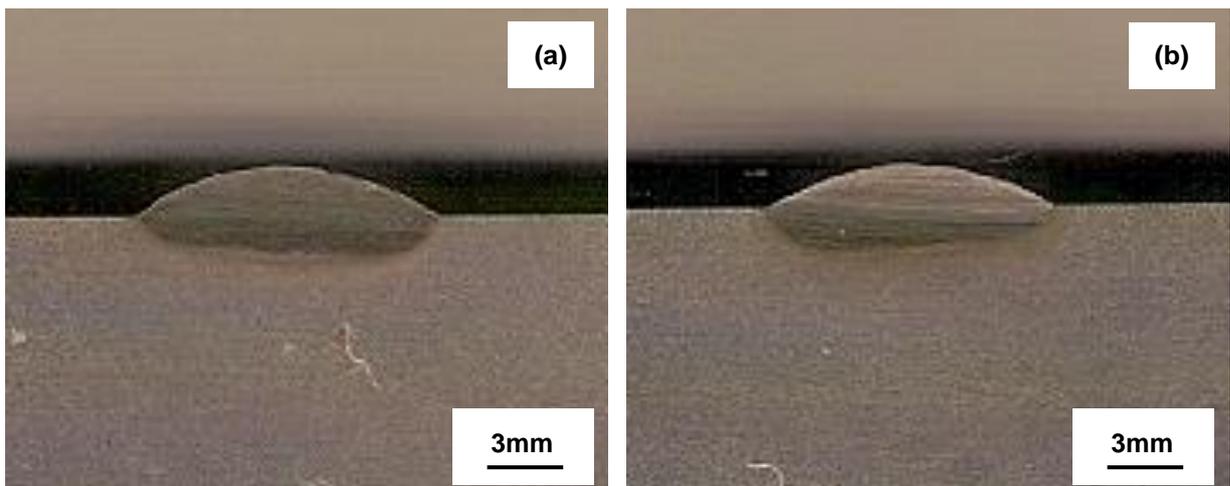
Figura 5.5 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi com pré-aquecimento de 300°C – corpo de prova soldado em um passe.



(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 5.6 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi com pré-aquecimento de 400°C – corpo de prova soldado em um passe.

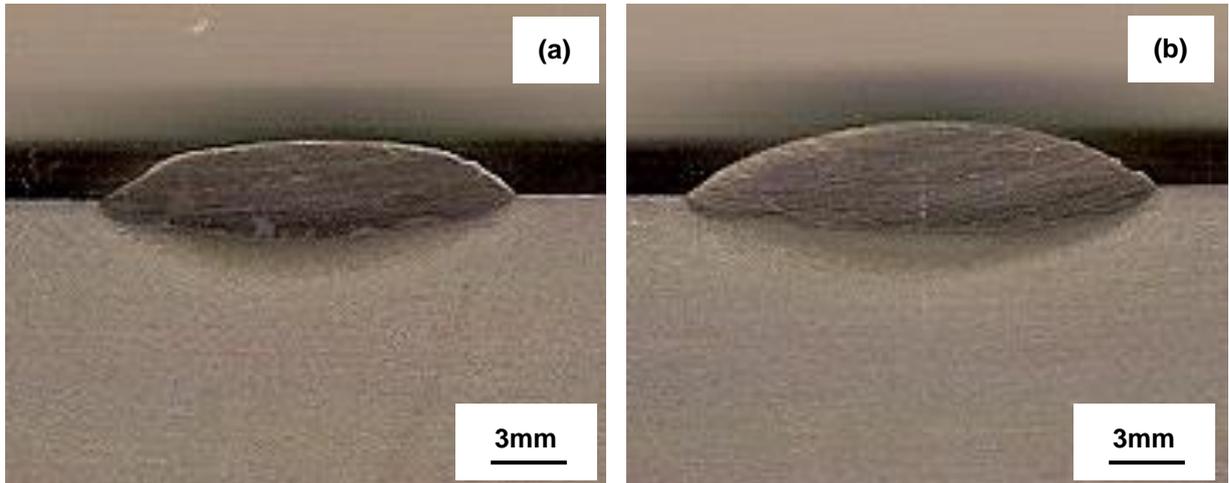


(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

As imagens exibidas nas Figuras 5.7 a 5.11 se referem às fotomicrografias do ferro fundido nodular soldado com eletrodo FeNi em dois passes.

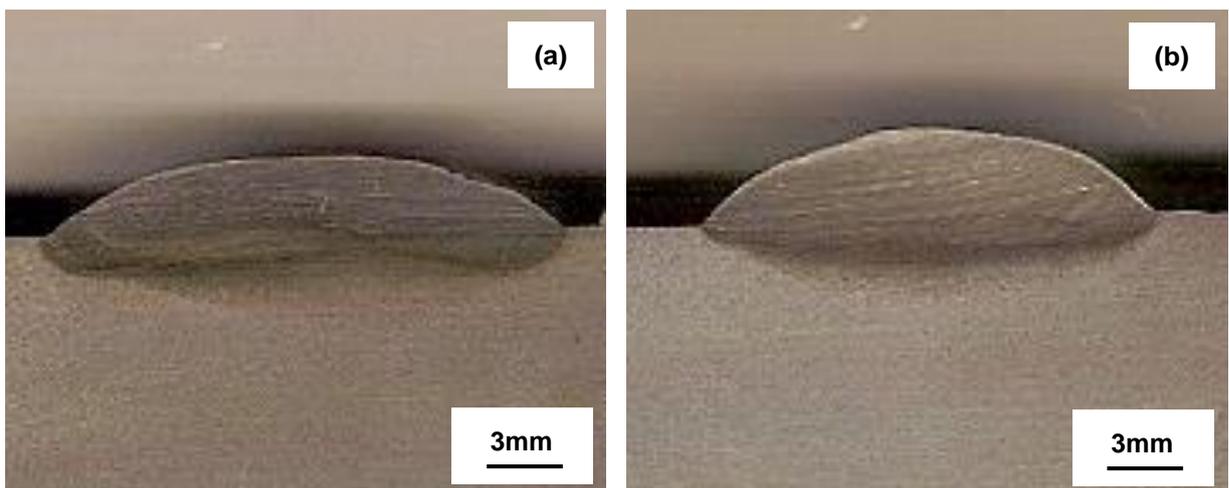
Figura 5.7 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi sem pré-aquecimento – corpo de prova soldado em dois passes.



(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 5.8 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi com pré-aquecimento de 100°C – corpo de prova soldado em dois passes.



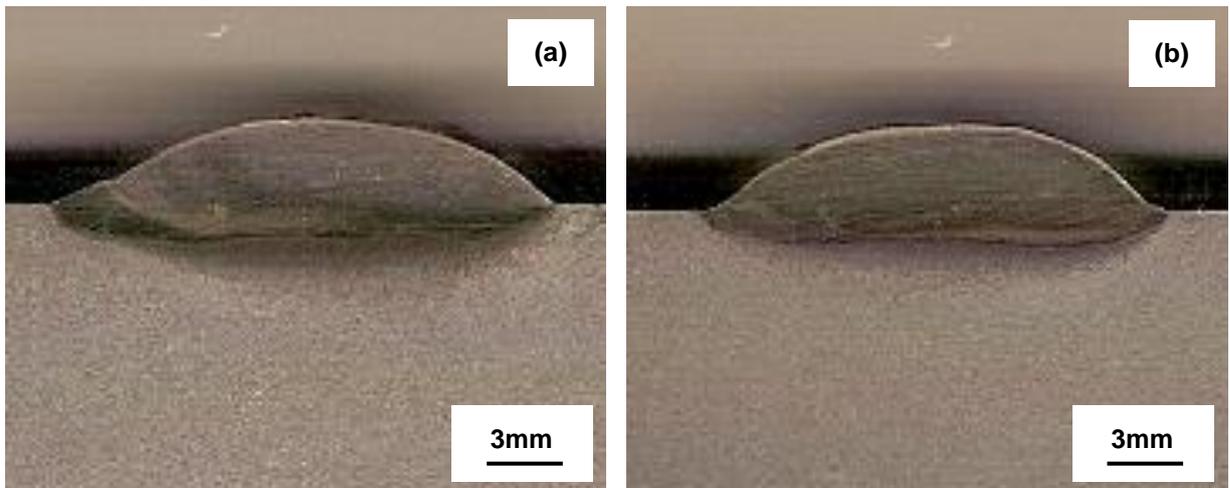
(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

Em comparação com as imagens apresentadas nas Figuras 5.2 a 5.6, amostras do material soldadas em um passe, observa-se que, para o material soldado em dois

passes, a largura das zonas fundidas é superior e as zonas termicamente afetadas, além de aparecerem mais nítidas, também são mais acentuadas/extensas. Foi possível, também, verificar o aumento da ZTA com o aumento dos valores da temperatura de pré-aquecimento.

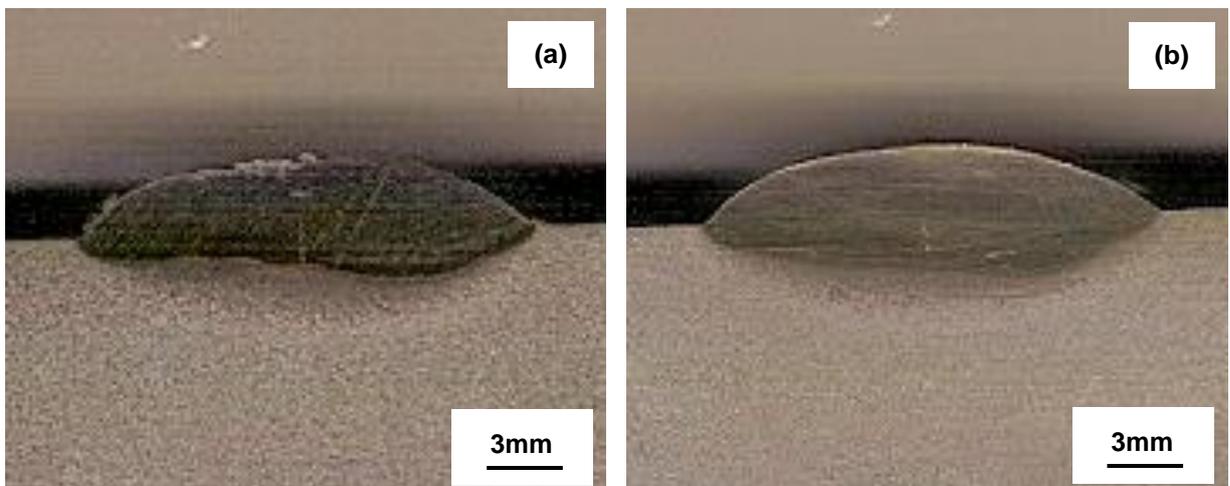
Figura 5.9 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi com pré-aquecimento de 200°C – corpo de prova soldado em dois passes.



(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

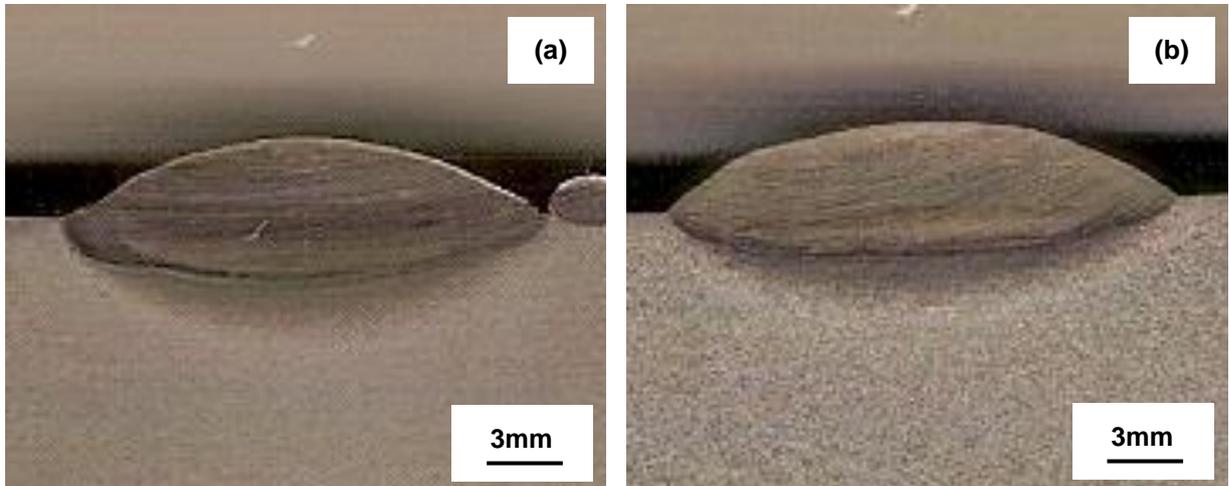
Figura 5.10 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi com pré-aquecimento de 300°C – corpo de prova soldado em dois passes.



(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 5.11 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi com pré-aquecimento de 400°C – corpo de prova soldado em dois passes.



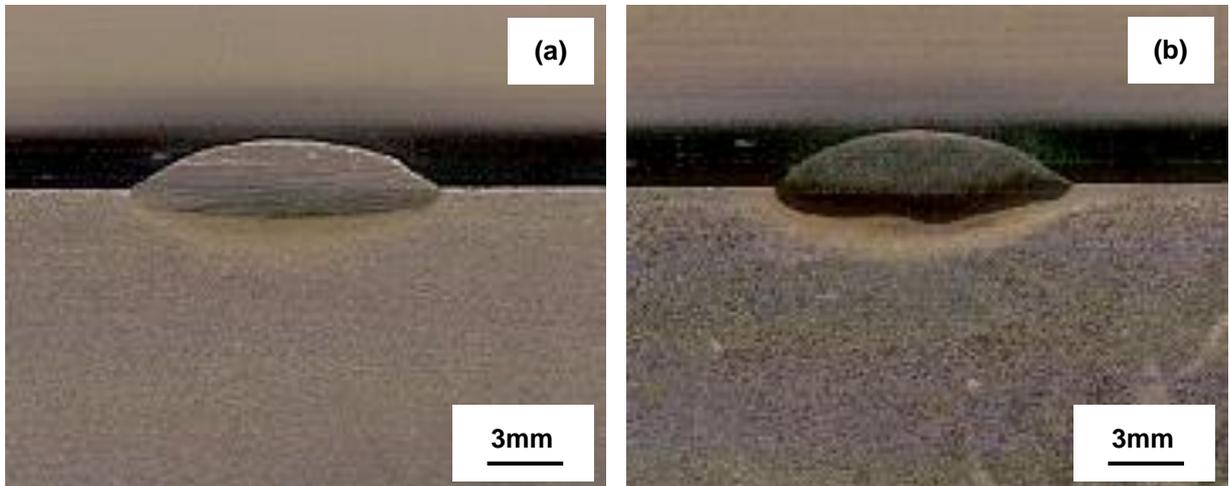
(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

Nas Figuras 5.12 a 5.16 são apresentadas as macrografias do ferro fundido nodular soldado em um passe com eletrodo Ni, nas quais são observadas as zonas fundidas e as zonas termicamente afetadas das amostras. Verifica-se, de maneira discreta, que a zona termicamente afetada do material soldado sem pré-aquecimento aparece de forma mais acentuada nas imagens que as demais, tanto em termos de contraste de cor como em termos de magnitude, diferentemente do foi observado para a operação realizada com eletrodo FeNi. Dessa forma, ainda que suavemente, verifica-se que, por meio dessa técnica, o pré-aquecimento parece ter alterado a estrutura do material, não sendo, entretanto, evidente a influência da temperatura empregada.

As imagens do material soldado em dois passes com eletrodo Ni são mostradas nas Figuras 5.17 a 5.21. De maneira análoga ao que foi observado anteriormente, o segundo passe de soldagem resultou em zonas fundidas mais extensas que aquelas exibidas pela liga soldada em um passe. Por outro lado, o emprego de pré-aquecimento pareceu levar a alterações, ainda que discretas, na zona termicamente afetada.

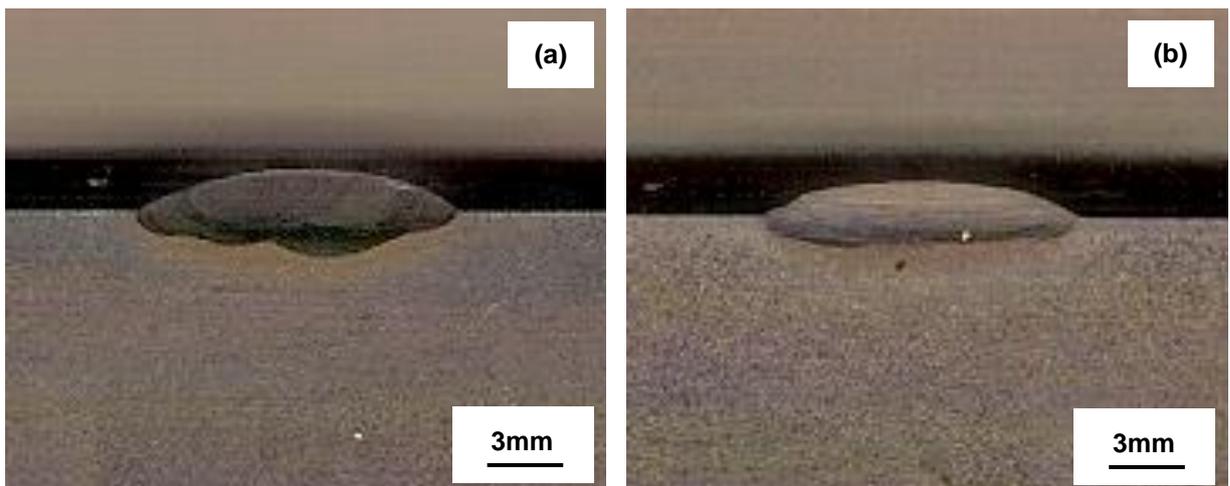
Figura 5.12 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo Ni sem pré-aquecimento – corpo de prova soldado em um passe.



(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

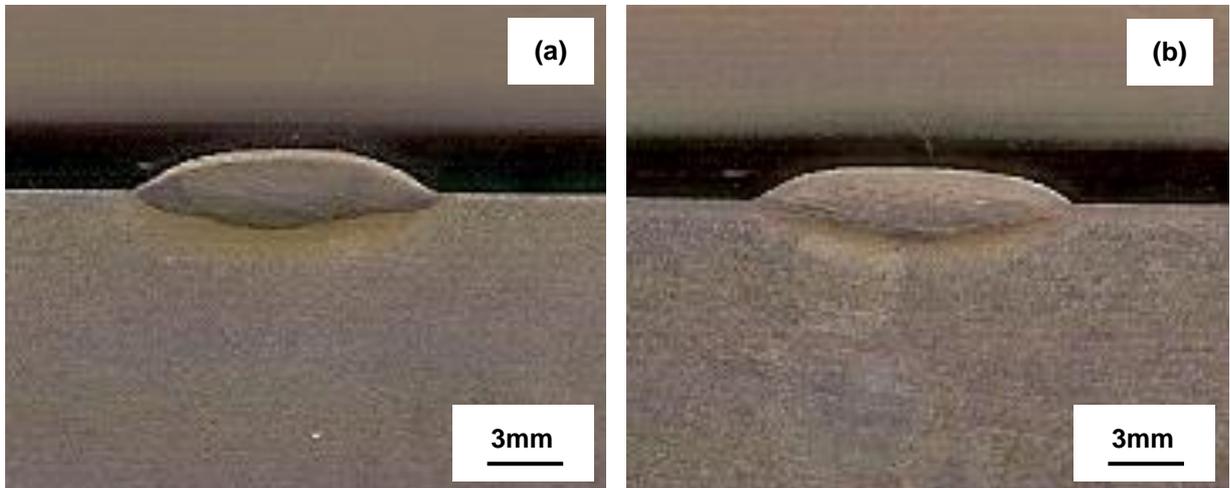
Figura 5.13 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 100°C – corpo de prova soldado em um passe.



(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

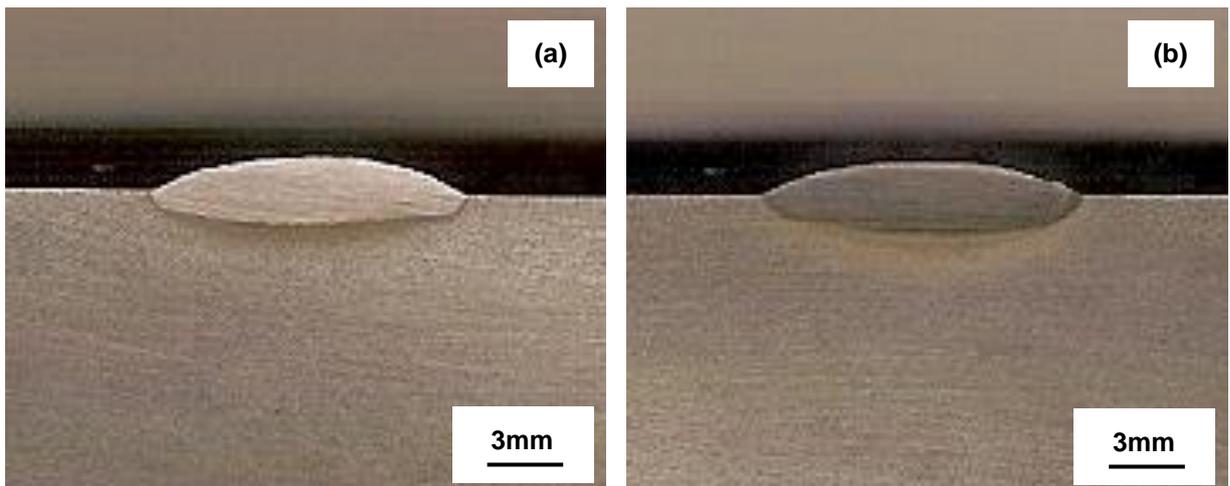
Figura 5.14 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 200°C – corpo de prova soldado em um passe.



(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

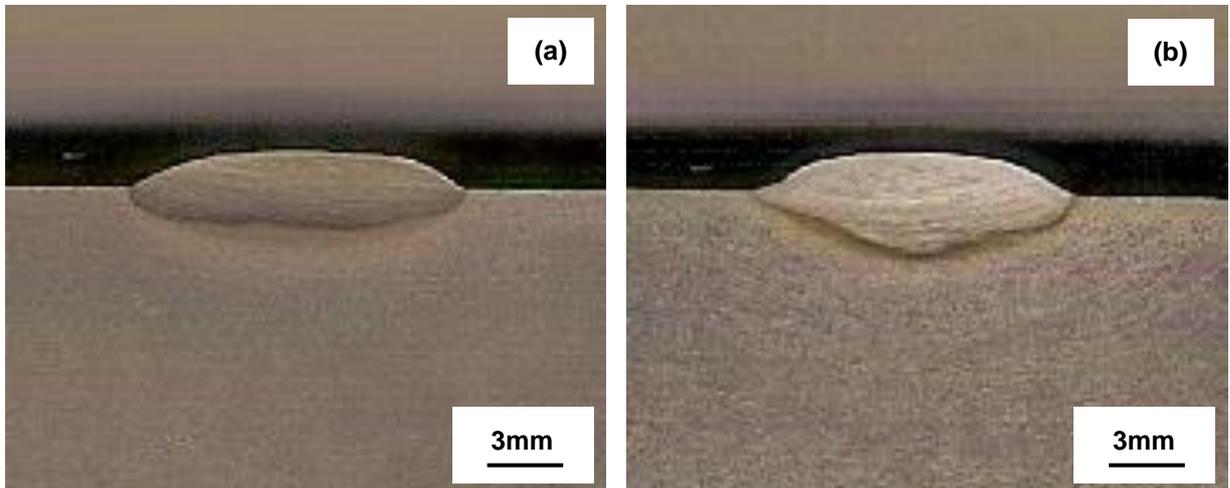
Figura 5.15 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 300°C – corpo de prova soldado em um passe.



(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

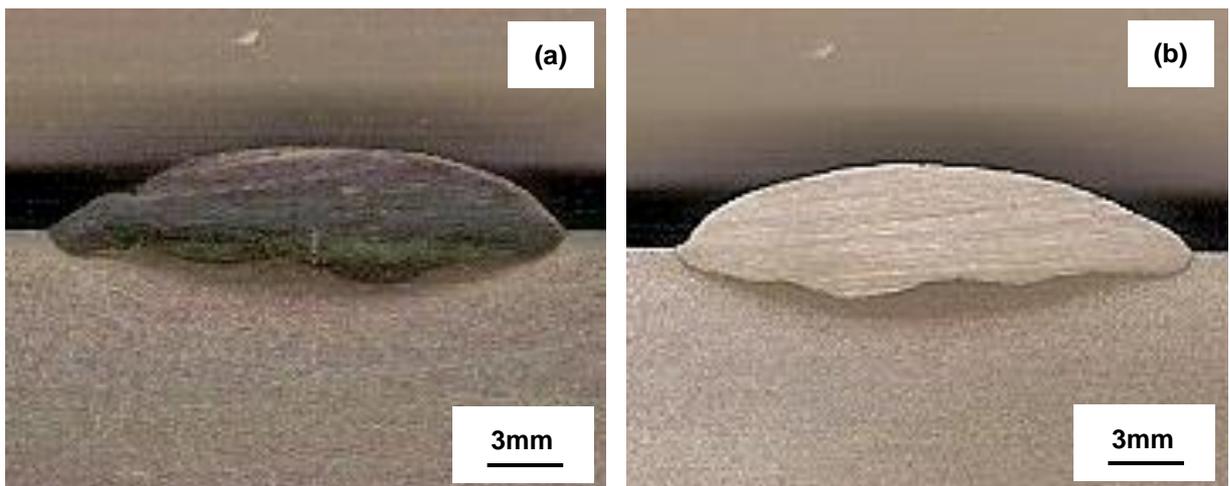
Figura 5.16 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 400°C – corpo de prova soldado em um passe.



(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

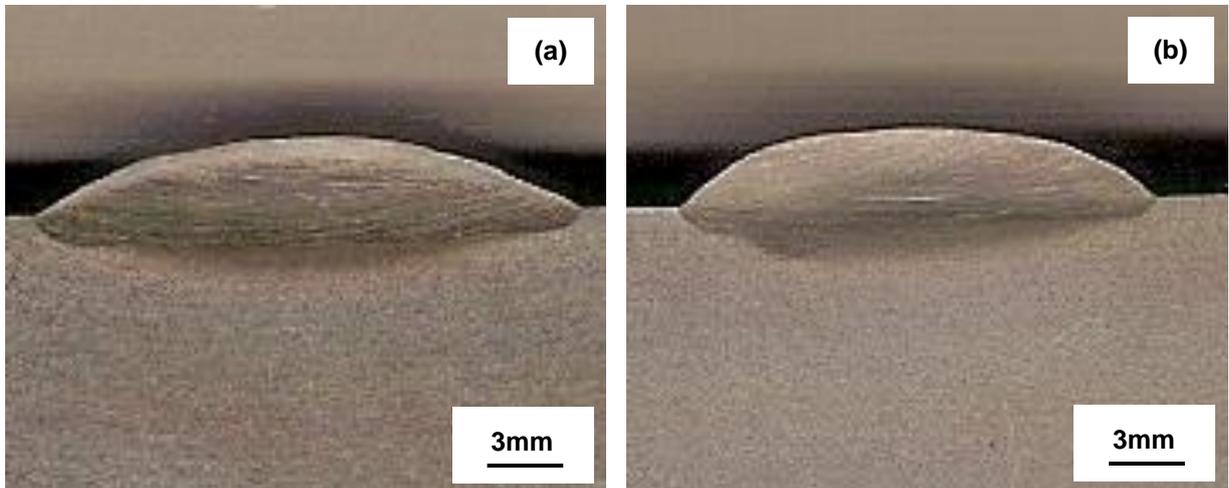
Figura 5.17 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo Ni sem pré-aquecimento – corpo de prova soldado em dois passes.



(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

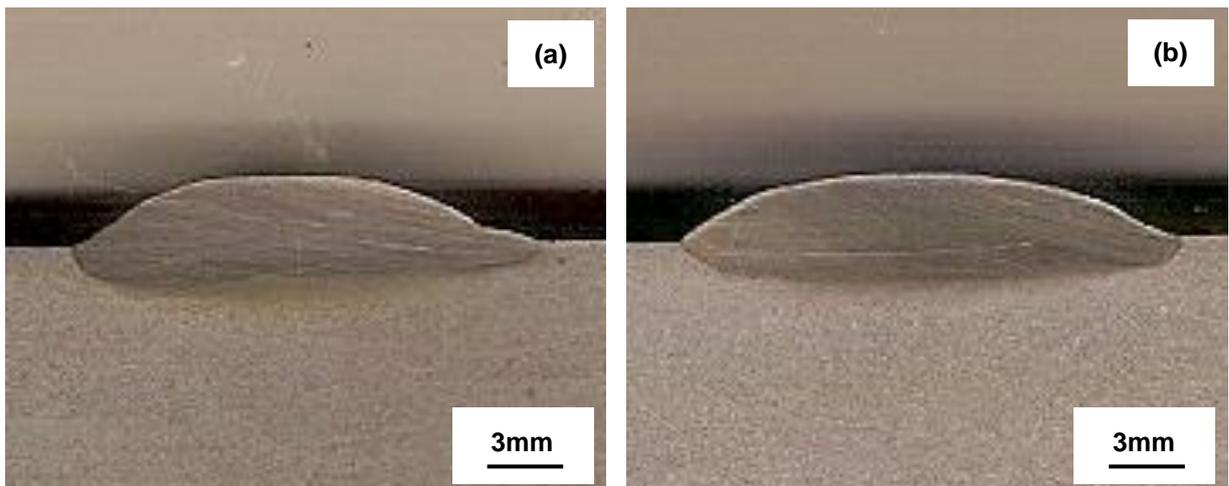
Figura 5.18 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 100°C – corpo de prova soldado em dois passes.



(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

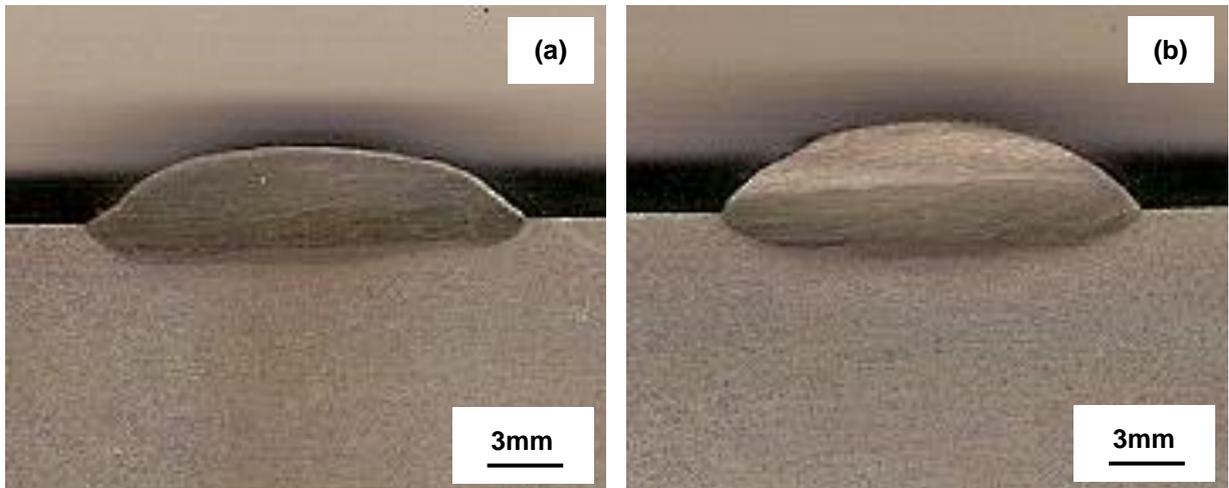
Figura 5.19 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 200°C – corpo de prova soldado em dois passes.



(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

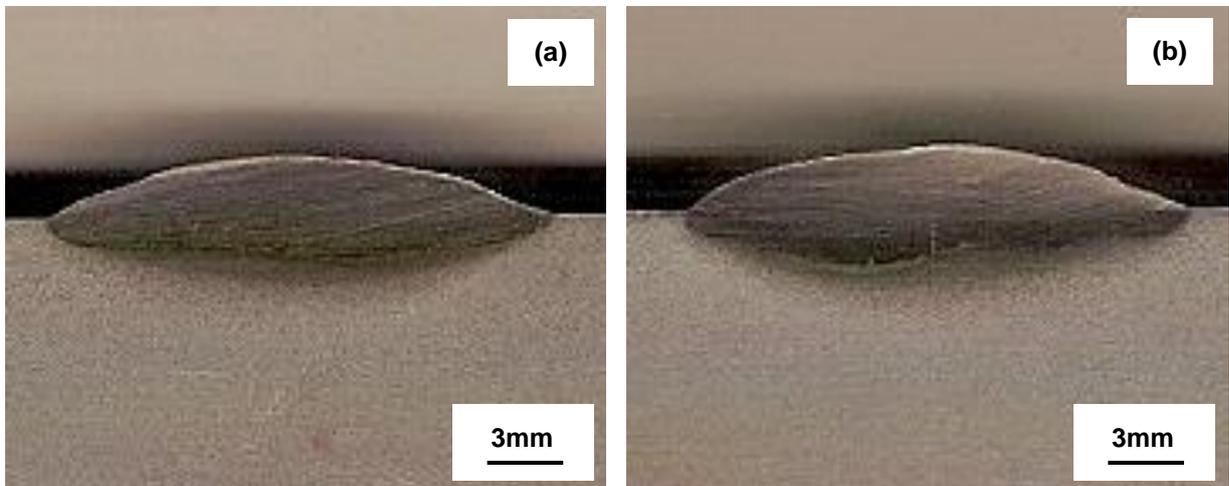
Figura 5.20 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 300°C – corpo de prova soldado em dois passes.



(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 5.21 – Macrografias dos corpos de prova soldados com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 400°C – corpo de prova soldado em dois passes.



(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

Ressalta-se que, apesar das fotomacrografias não exibirem os efeitos de mudanças nas características do eletrodo e das condições iniciais dos corpos de prova (sem pré-aquecimento e com pré-aquecimento em temperaturas diversas) de forma acentuada, outras alterações na estrutura do material podem ter ocorrido, e a técnica de caracterização empregada pode não ter sido capaz de detectar as mesmas.

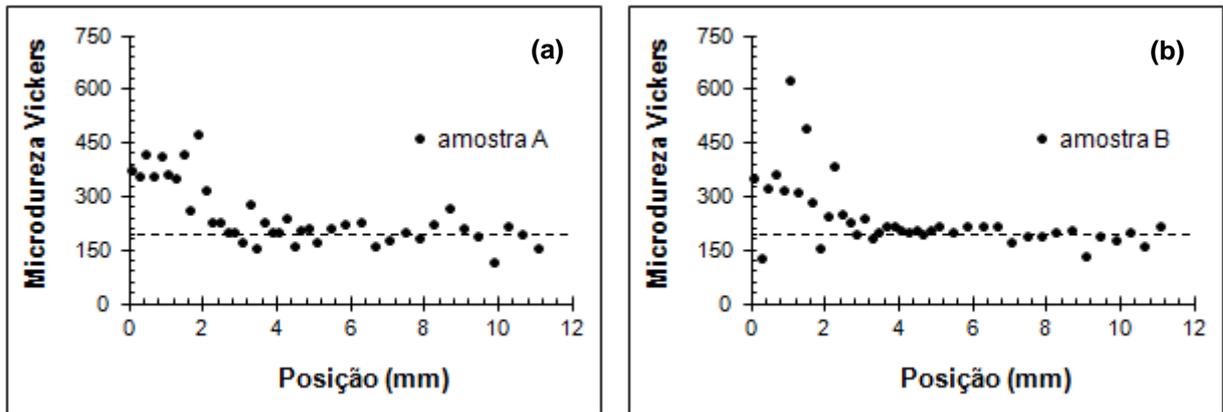
5.3. Distribuição de Microdureza nos Corpos de Prova Soldados

Nas Figuras 5.22 a 5.26 são apresentadas as distribuições de dureza Vickers do ferro fundido nodular soldado em um passe com eletrodo FeNi, conforme o procedimento representado esquematicamente na Figura 4.7. Em todos os gráficos está superposto também (como uma reta tracejada) o resultado de dureza média do material no estado inicial, como parâmetro de comparação.

Considerando inicialmente as amostras com deposição de cordão de solda sem pré-aquecimento, observa-se que os valores iniciais de dureza são superiores àquele relativo à liga no estado como adquirida, seguidos de uma elevação nos resultados (mais acentuada na amostra B) e depois queda até valores próximos ao da linha tracejada (após cerca de 2mm – 2,4mm do ponto inicial de medida). A partir desse momento, os resultados de dureza se situam próximos à propriedade do ferro fundido no estado inicial, com certa dispersão. Essa última pode ser associada à microestrutura inicial do metal, que apresenta nódulos de grafita e matriz ferrítica perlítica, ou seja, quando o ensaio se deu em uma região com mais perlita, o valor de dureza apareceu mais elevado, ocorrendo o oposto com a realização do ensaio em uma região com predominância de ferrita e/ou grafita. Os dados iniciais de dureza podem ser associados à zona fundida do material, a elevação à zona termicamente afetada com desenvolvimento de microestrutura mais resistente (martensita, ledeburita, entre outros) e a queda para valores próximos à média, exibida na Tabela 5.1, ao metal de base.

Para as amostras soldadas com pré-aquecimento de 100°C e 200°C, comportamento similar ao descrito anteriormente é verificado, com exceção dos dados iniciais de dureza, ou seja, dos resultados obtidos na zona fundida, que se situam próximos àquele do material no estado inicial. Para as amostras soldadas com pré-aquecimento de 300°C e 400°C novamente é verificada a ocorrência de valores iniciais de dureza superiores à média do ferro fundido, da mesma ordem de grandeza daqueles determinados para a liga sem pré-aquecimento.

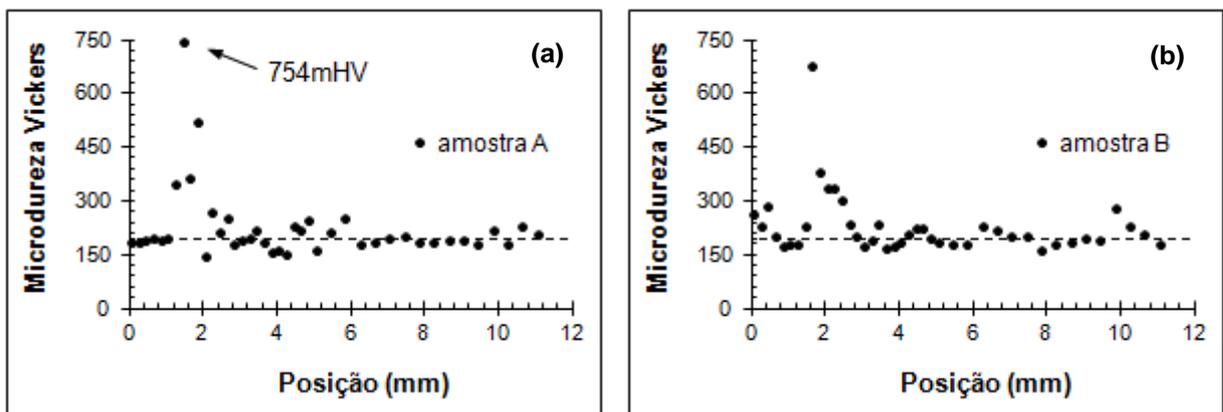
Figura 5.22 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi sem pré-aquecimento – soldagem em um passe.



(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

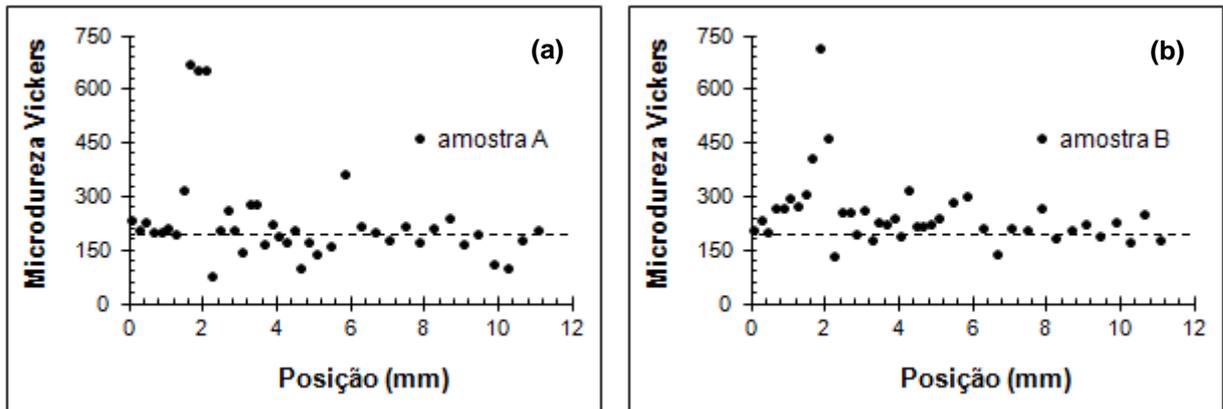
Figura 5.23 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi com pré-aquecimento de 100°C – soldagem em um passe



(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

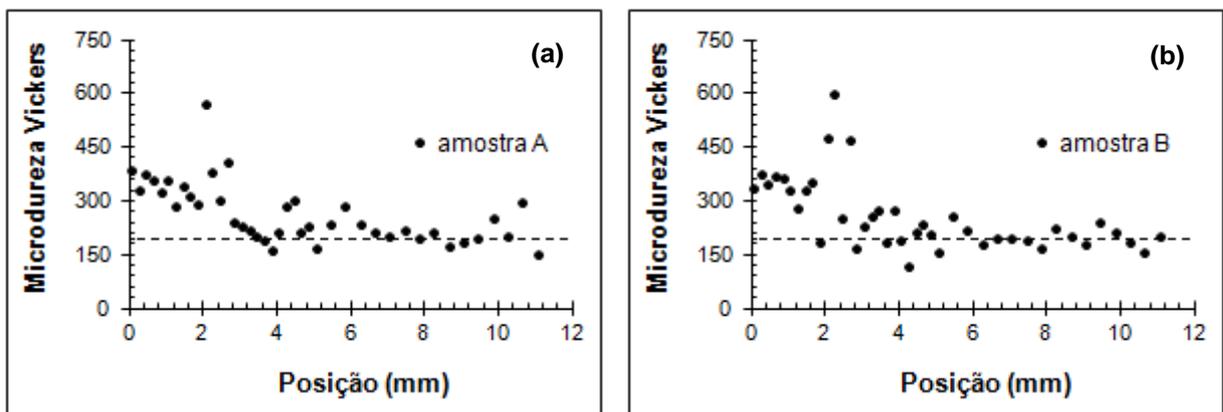
Figura 5.24 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi com pré-aquecimento de 200°C – soldagem em um passe



(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

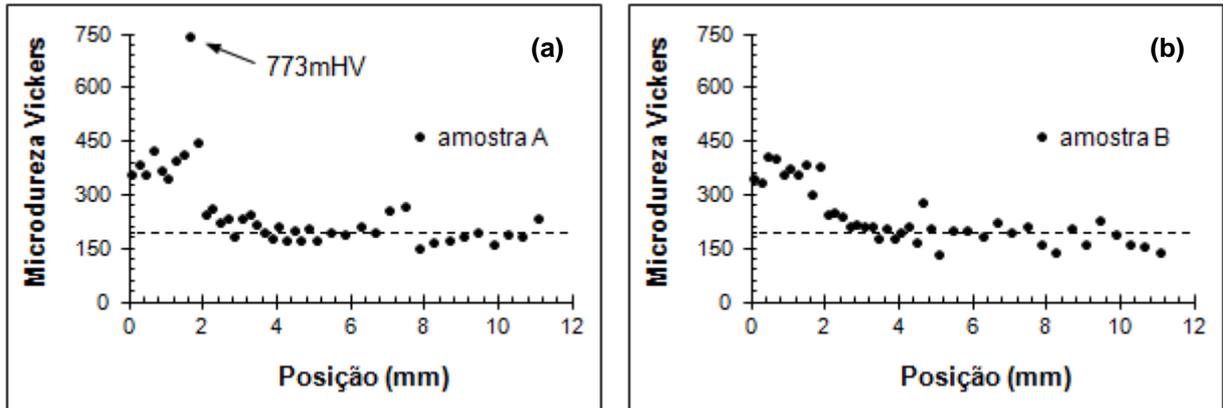
Figura 5.25 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi com pré-aquecimento de 300°C – soldagem em um passe



(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 5.26 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi com pré-aquecimento de 400°C – soldagem em um passe

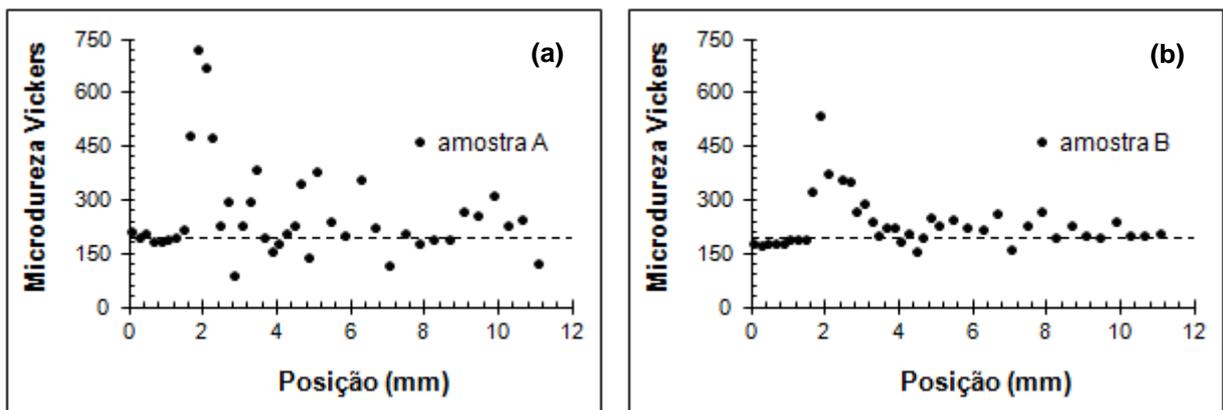


(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

Nas Figuras 5.27 a 5.31 são exibidas as distribuições de dureza Vickers do ferro fundido nodular soldado em dois passes com eletrodo FeNi. Similarmente às figuras anteriores (e para os demais perfis de microdureza), a dureza média do material está representada como uma reta tracejada nos gráficos.

Figura 5.27 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi sem pré-aquecimento – soldagem em dois passes.

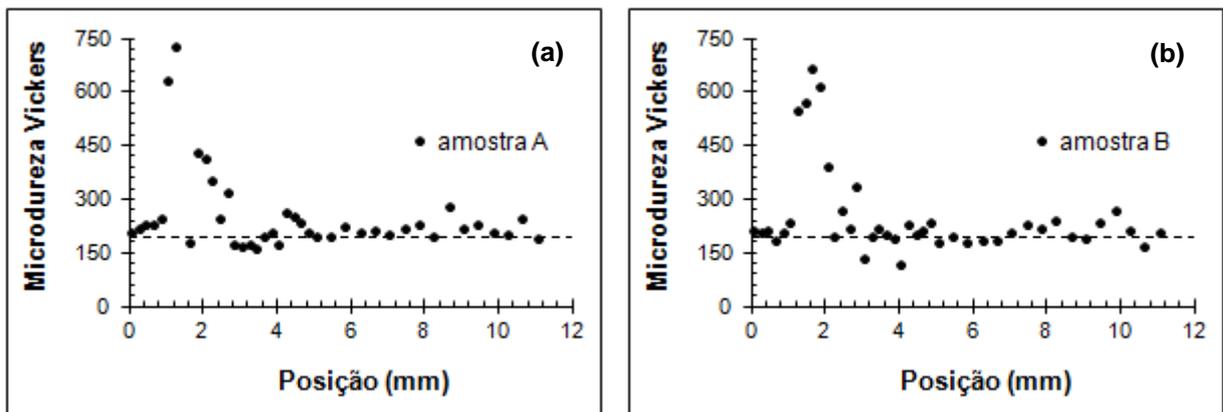


(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

Para todas as condições avaliadas, com exceção da amostra A soldada com pré-aquecimento a 400°C, nota-se que a dureza da zona fundida é similar ao do material no estado inicial, seguida de um aumento acentuado e queda ao atingir supostamente a região do metal de base.

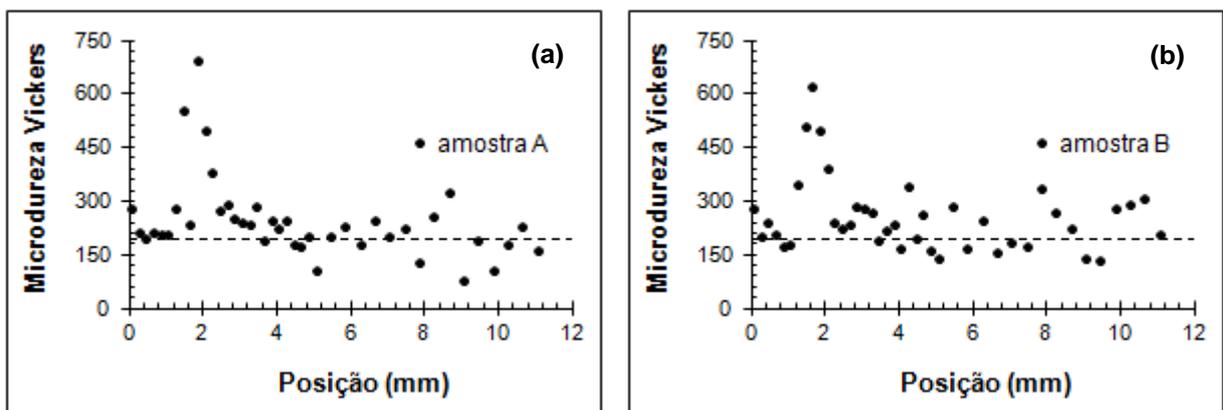
Figura 5.28 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi com pré-aquecimento de 100°C – soldagem em dois passes



(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

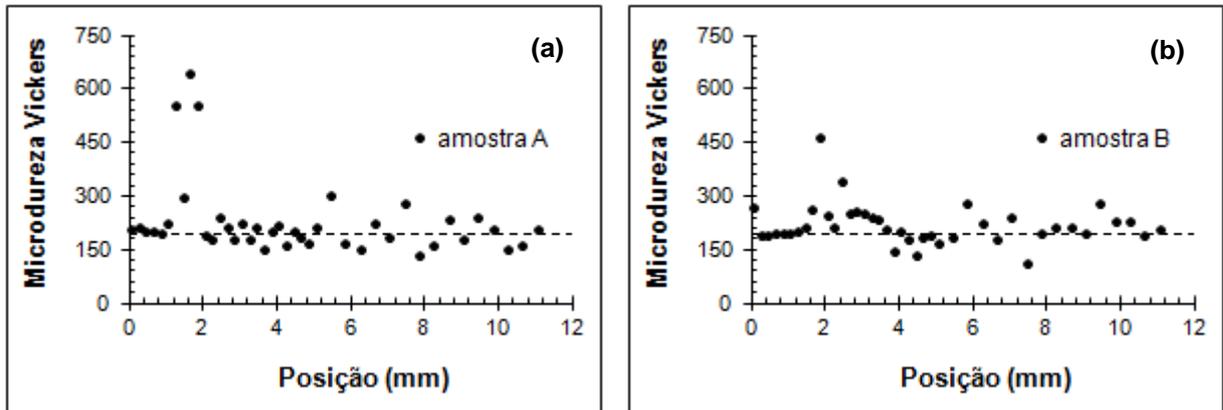
Figura 5.29 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi com pré-aquecimento de 200°C – soldagem em dois passes



(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

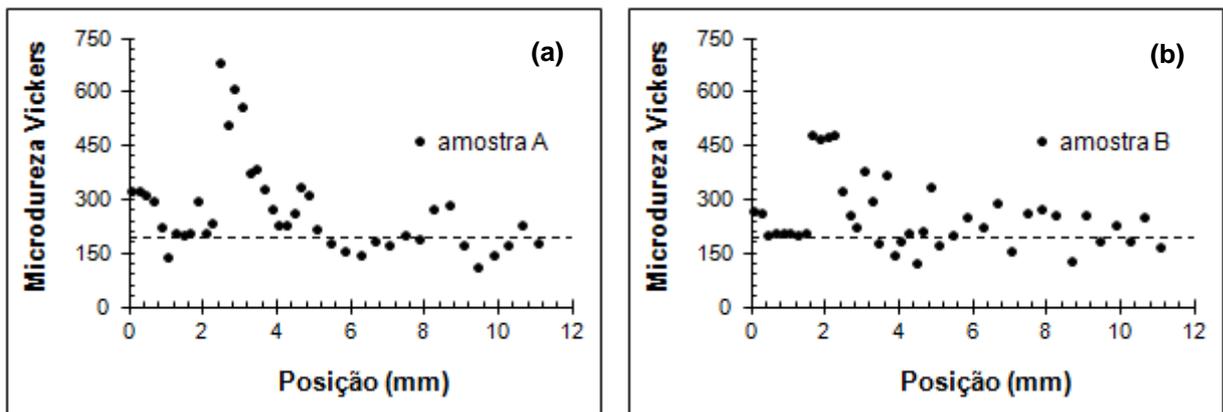
Figura 5.30 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi com pré-aquecimento de 300°C – soldagem em dois passes



(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 5.31 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo FeNi com pré-aquecimento de 400°C – soldagem em dois passes



(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

Nas Tabelas 5.2 e 5.3 são mostrados os valores de dureza mais elevados apresentados pelos corpos de prova de ferro fundido nodular após a deposição de cordão de solda em um passe e em dois passes com eletrodo FeNi, acompanhados da distância do ponto considerado como central, de início das medições (conforme representação esquemática na Figura 4.6). Em seguida, nas Figuras 5.32 e 5.33, são mostradas as representações gráficas dos mesmos.

Tabela 5.2 – Valores de dureza mais elevados apresentados após soldagem em um passe com eletrodo FeNi acompanhados da distância na qual aparecem.

pré-aquecimento	dureza HV (distância da medida – mm)				
	—	100°C	200°C	300°C	400°C
amostra A	477 (1,8)	754 (1,4)	677 (1,6)	571 (2,0)	414 (0,4)
amostra B	627 (1,0)	680 (1,6)	717 (1,8)	602 (2,2)	610 (1,2)
valor médio	552 (1,4)	717 (1,5)	697 (1,7)	586,5 (2,1)	512 (0,8)

Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 5.3 – Valores de dureza mais elevados apresentados após soldagem em dois passes com eletrodo FeNi acompanhados da distância na qual aparecem.

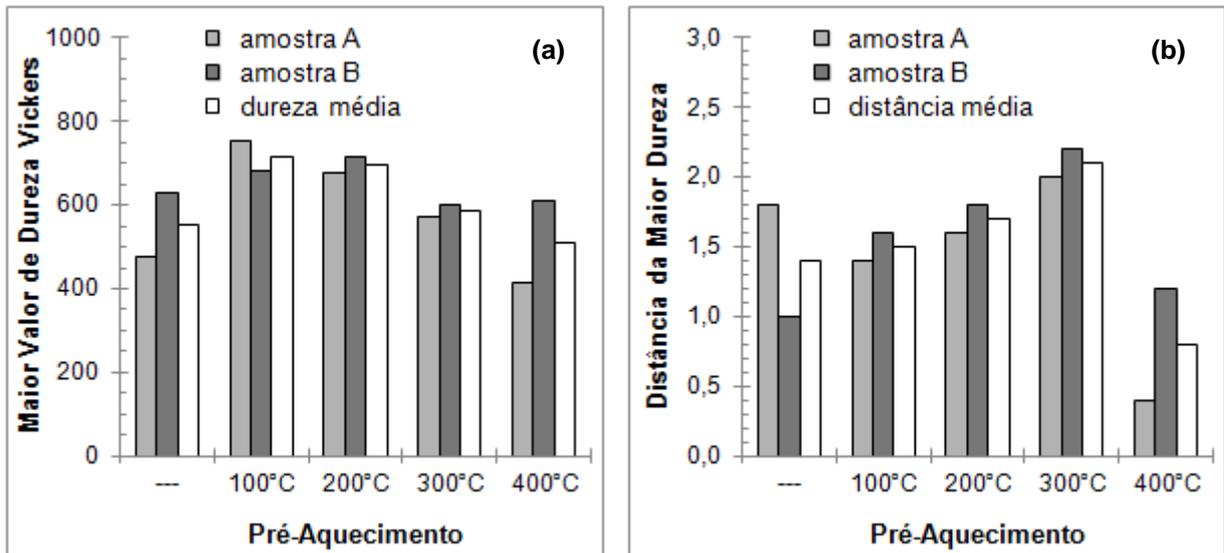
pré-aquecimento	dureza HV (distância da medida – mm)				
	—	100°C	200°C	300°C	400°C
amostra A	724 (1,8)	801 (1,4)	695 (1,8)	649 (1,6)	688 (2,4)
amostra B	540 (1,8)	671 (1,6)	626 (1,6)	467 (1,8)	484 (2,2)
valor médio	632 (1,8)	736 (1,5)	660,5 (1,7)	558 (1,7)	586 (2,3)

Fonte: Produzido pelo autor.

Considerando inicialmente os valores de dureza máxima nas amostras soldadas com eletrodo FeNi, em geral, tanto para o processo realizado em um passe como para o processo realizado em dois passes, verifica-se um aumento nos resultados com a realização do pré-aquecimento em 100°C em comparação com os dados do material soldado sem pré-aquecimento. Em seguida, observa-se uma tendência à queda na dureza com a elevação da temperatura de pré-aquecimento.

Já para a distância na qual os maiores valores de dureza são verificados, para o ferro fundido soldado em um passe observa-se um aumento com a realização de pré-aquecimento e com a temperatura de pré-aquecimento (exceção 400°C). Para a liga soldada em dois passes, verifica-se uma queda inicial nessa distância com a realização de pré-aquecimento seguida de aumento com a temperatura.

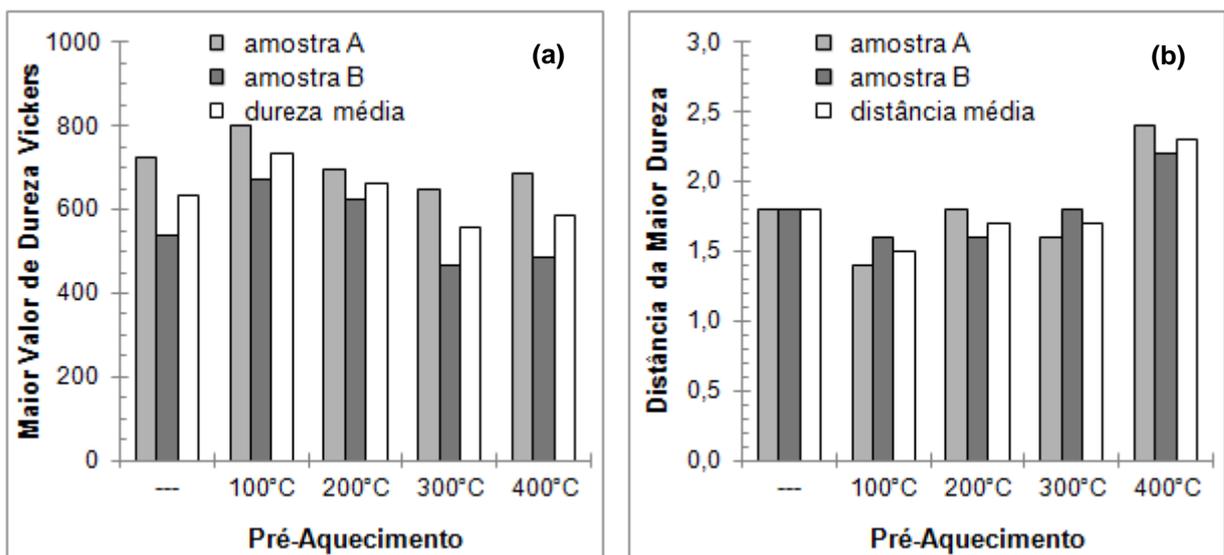
Figura 5.32 – Valores de dureza mais elevados apresentados após soldagem em um passe com eletrodo FeNi acompanhados da distância na qual aparecem.



(a) Dureza e (b) Distância.

Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 5.33 – Valores de dureza mais elevados apresentados após soldagem em dois passes com eletrodo FeNi acompanhados da distância na qual aparecem.



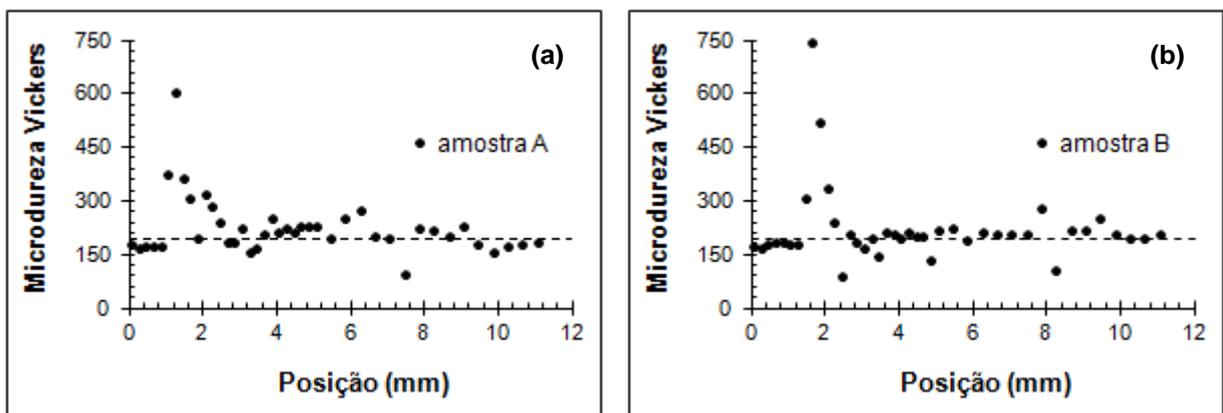
(a) Dureza e (b) Distância.

Fonte: Produzido pelo autor.

Nas Figuras 5.34 a 5.38 são exibidas as distribuições de microdureza das amostras de ferro fundido nodular com deposição de cordão de solda em um passe com eletrodo Ni. Para todas as situações, de maneira qualitativa, o comportamento é similar. Inicialmente, na região que equivaleria à zona fundida, os valores de dureza são próximos do resultado do material no estado inicial. Em seguida, é observado um aumento acentuado nos dados, que em sua maioria se apresentam na ordem de grandeza de estruturas aciculares, como a estrutura martensítica, caracterizando o que seria a zona termicamente afetada. Essa faixa na qual o endurecimento é verificado é relativamente pequena e, em seguida, os resultados se tornam novamente próximos ao do material no estado inicial.

Os perfis de dureza Vickers determinados para as amostras de ferro fundido nodular com deposição de cordão de solda em dois passes empregando eletrodo Ni são apresentados nas Figuras 5.39 a 5.43. Percebe-se, de forma análoga ao que ocorreu para o material soldado em um passe com o mesmo eletrodo, que o comportamento é relativamente similar, independente da realização de pré-aquecimento e do valor de temperatura. Em adição a este fato, verifica-se que as distribuições de dureza no ferro fundido com deposição de cordão em um passe e em dois passes são parecidos.

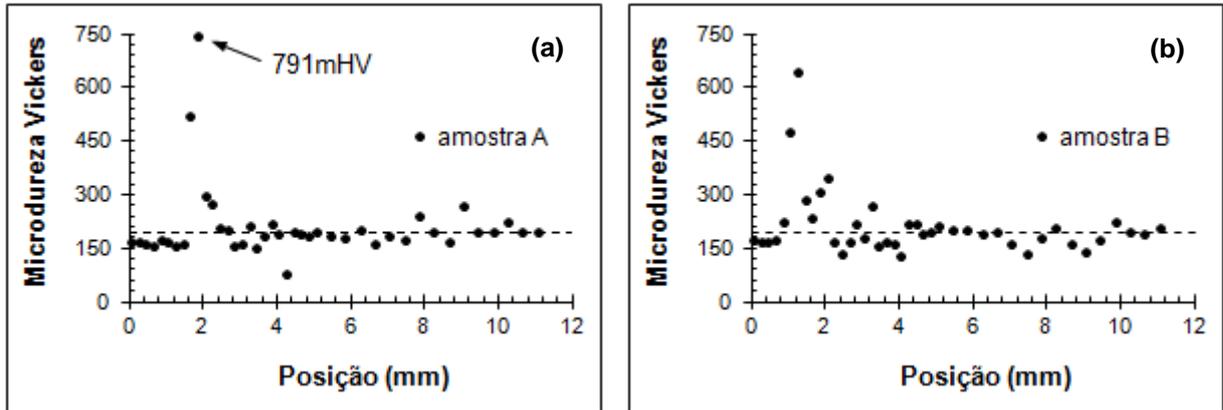
Figura 5.34 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo Ni sem pré-aquecimento – soldagem em um passe.



(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

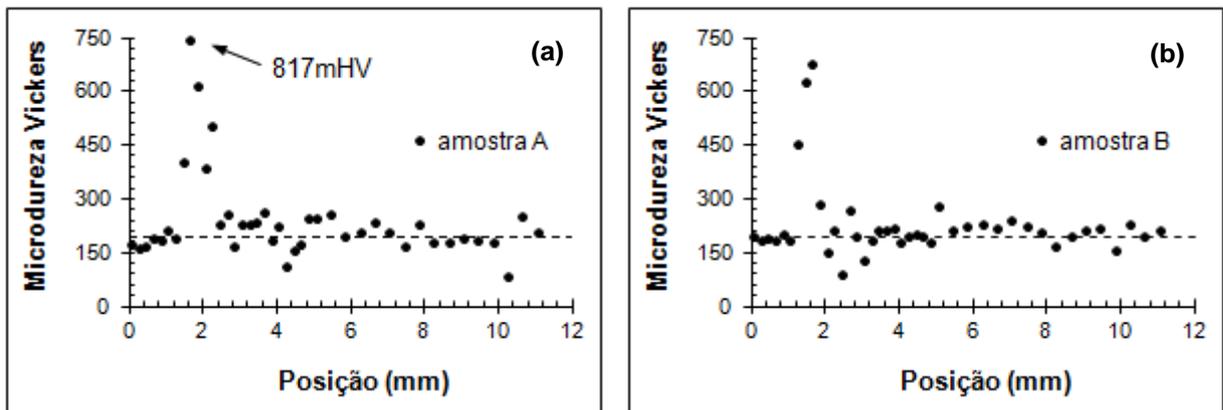
Figura 5.35 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 100°C – soldagem em um passe.



(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

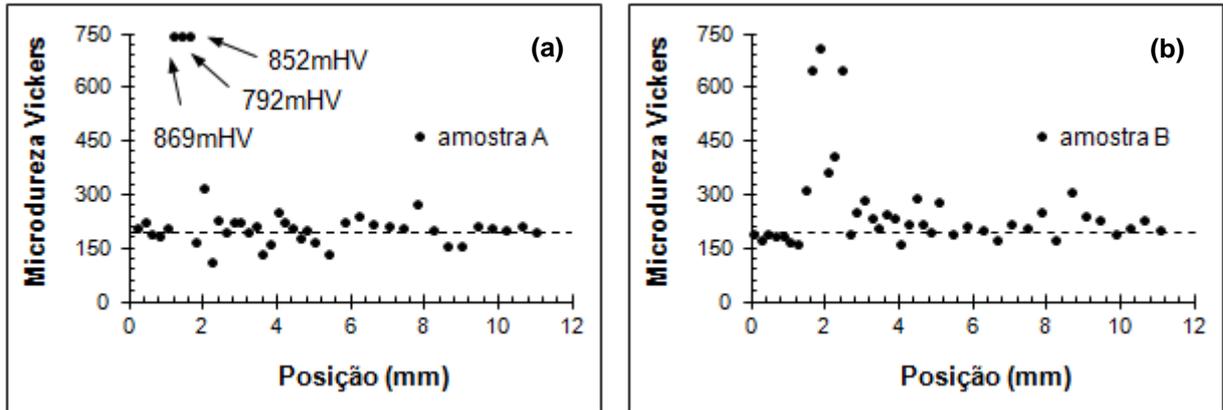
Figura 5.36 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 200°C – soldagem em um passe.



(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

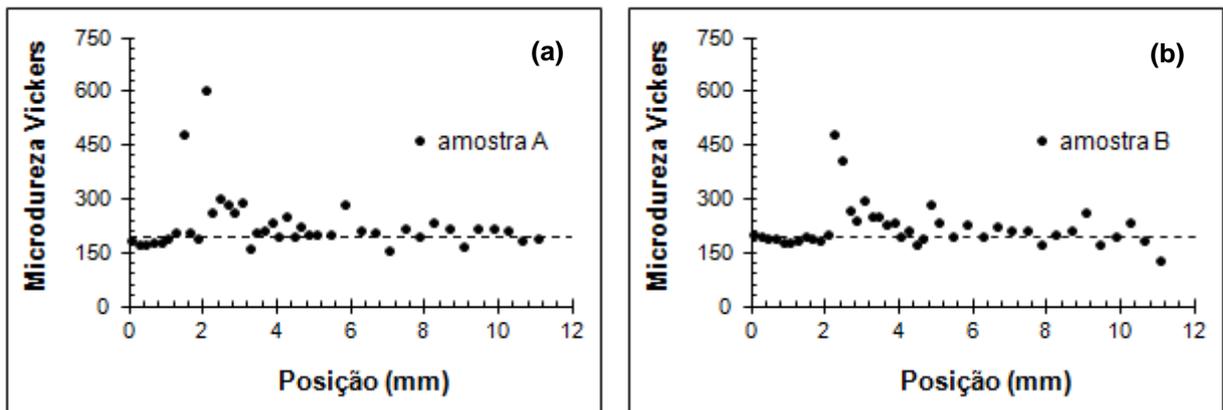
Figura 5.37 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 300°C – soldagem em um passe.



(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

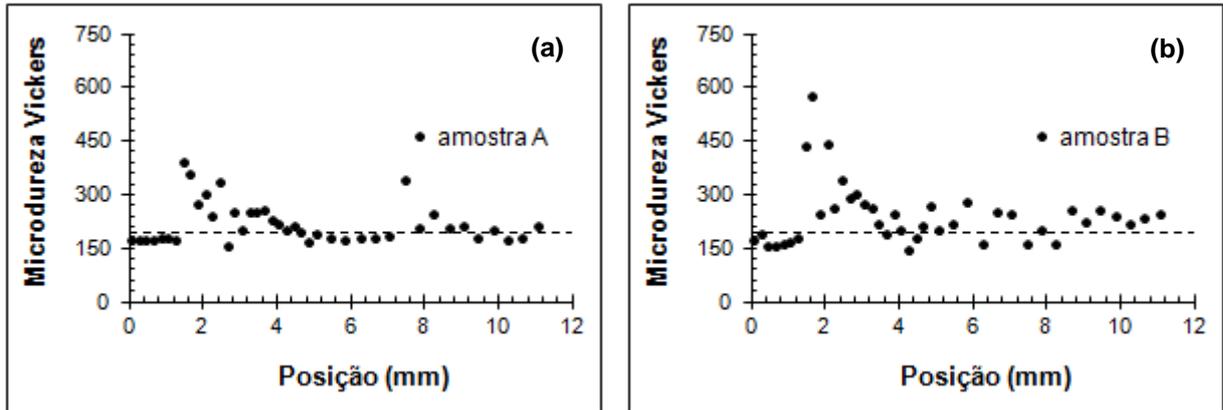
Figura 5.38 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 400°C – soldagem em um passe.



(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

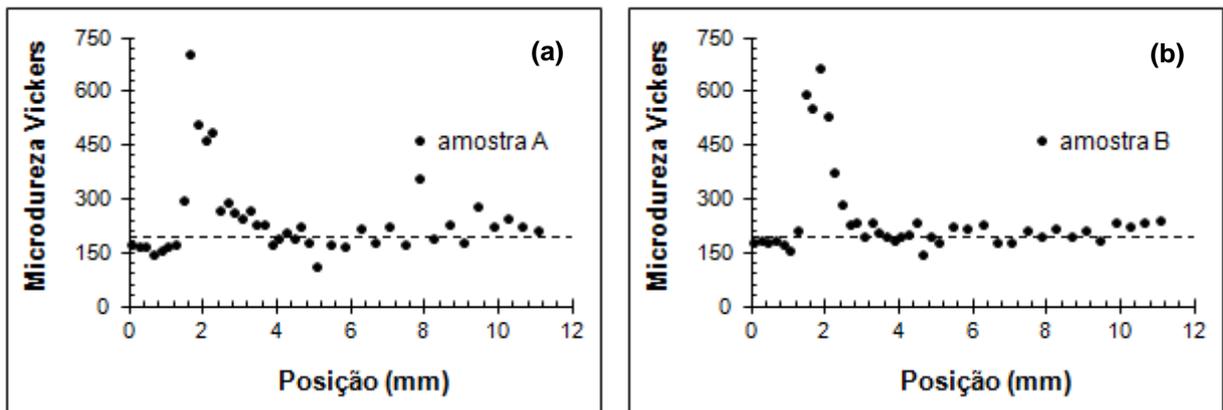
Figura 5.39 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo Ni sem pré-aquecimento – soldagem em dois passes.



(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

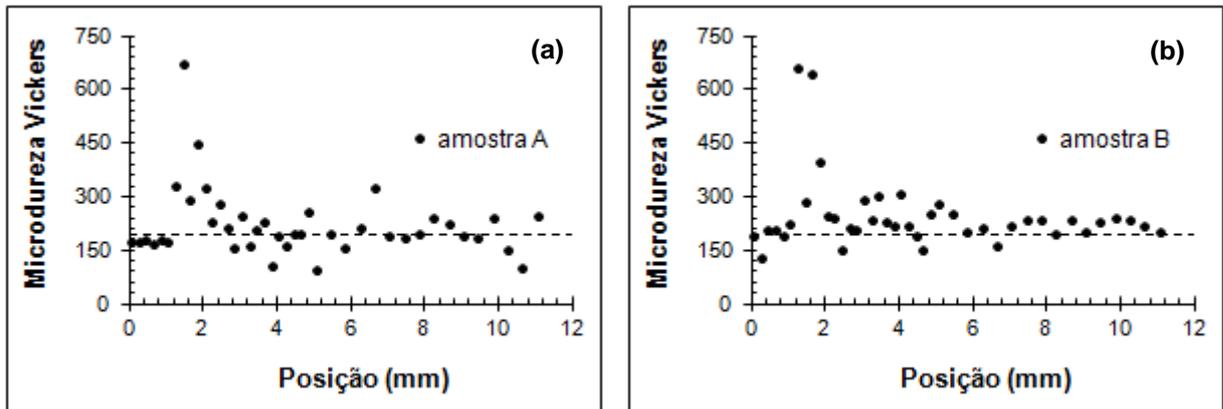
Figura 5.40 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 100°C – soldagem em dois passes.



(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

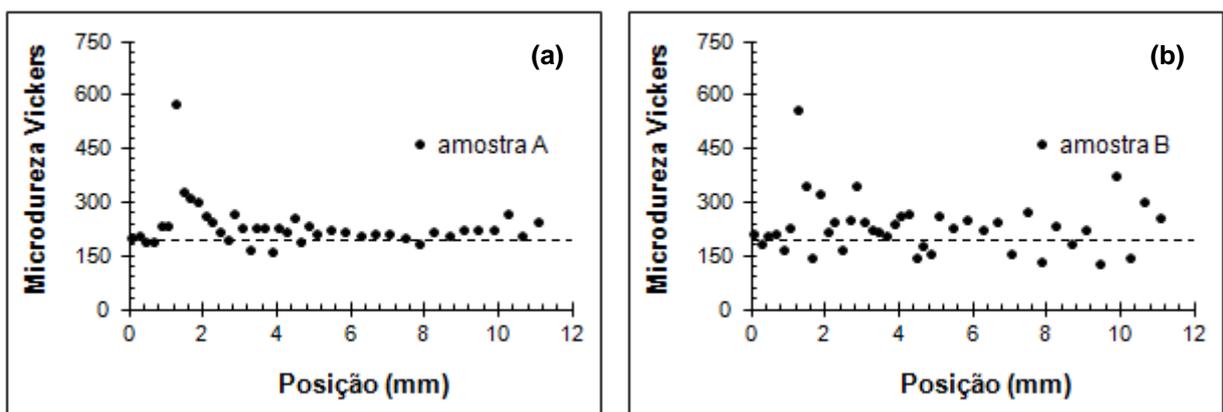
Figura 5.41 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 200°C – soldagem em dois passes.



(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

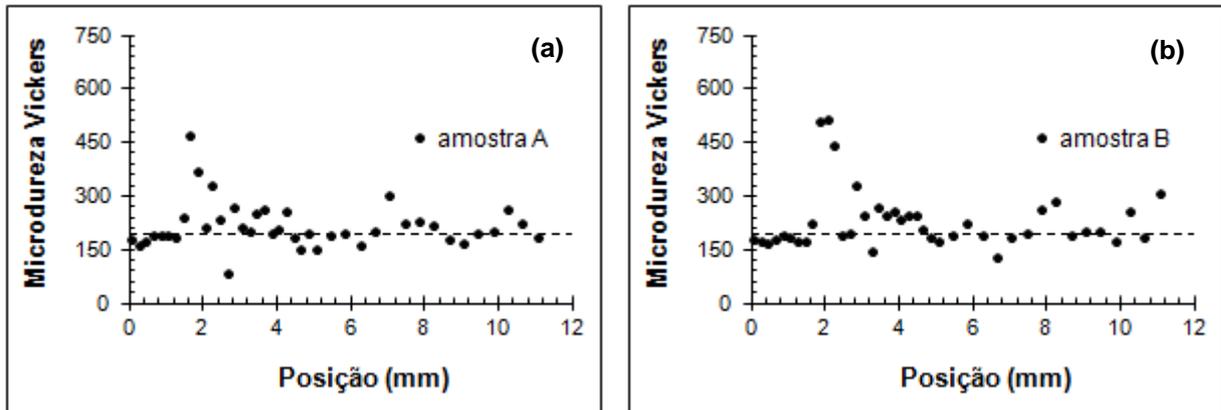
Figura 5.42 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 300°C – soldagem em dois passes.



(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 5.43 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 400°C – soldagem em dois passes.



(a) Amostra A e (b) Amostra B.

Fonte: Produzido pelo autor.

Nas Tabelas 5.4 e 5.5 são apresentados os resultados de dureza mais elevados obtidos pelo ferro fundido nodular soldado com eletrodo Ni com as distâncias do ponto considerado como central, seguidas das Figuras 5.44 e 5.45, com as representações das mesmas.

Tabela 5.4 – Valores de dureza mais elevados apresentados após soldagem em um passe com eletrodo Ni acompanhados da distância na qual aparecem.

pré-aquecimento	dureza HV (distância da medida – mm)				
	—	100°C	200°C	300°C	400°C
amostra A	610 (1,2)	791 (1,8)	817 (1,6)	869 (1,6)	606 (2,0)
amostra B	750 (1,6)	644 (1,2)	679 (1,6)	713 (1,8)	485 (2,2)
valor médio	680 (1,4)	717,5 (1,5)	748 (1,6)	791 (1,7)	545,5 (2,1)

Fonte: Produzido pelo autor.

Para o material soldado em um passe, em relação aos valores máximos de dureza, verifica-se em geral uma tendência de aumento com a realização de pré-aquecimento e com a temperatura do mesmo, exceto ao passar de 300°C para 400°C. Em termos de distância do ponto considerado como central, observa-se

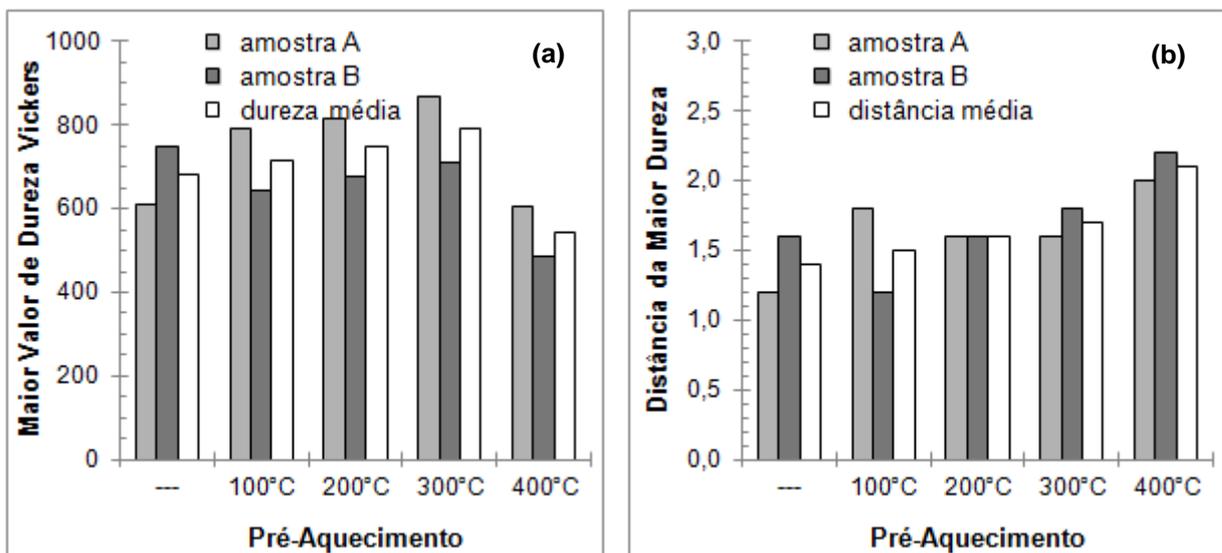
também tendência a aumentar com a temperatura. Já para o material com deposição em dois passes, os valores de dureza aumentam com o pré-aquecimento de 100°C depois tendem a diminuir com a temperatura. Em relação á distância não é observado um comportamento geral.

Tabela 5.5 – Valores de dureza mais elevados apresentados após soldagem em dois passes com eletrodo Ni acompanhados da distância na qual aparecem.

	dureza HV (distância da medida – mm)				
pré-aquecimento	—	100°C	200°C	300°C	400°C
amostra A	396 (1,4)	710 (1,6)	674 (1,4)	578 (1,2)	474 (1,6)
amostra B	577 (1,6)	671 (1,8)	661 (1,2)	563 (1,2)	517 (2,0)
valor médio	486,5 (1,5)	690,5 (1,7)	667,5 (1,3)	570,5 (1,2)	495,5 (1,8)

Fonte: Produzido pelo autor.

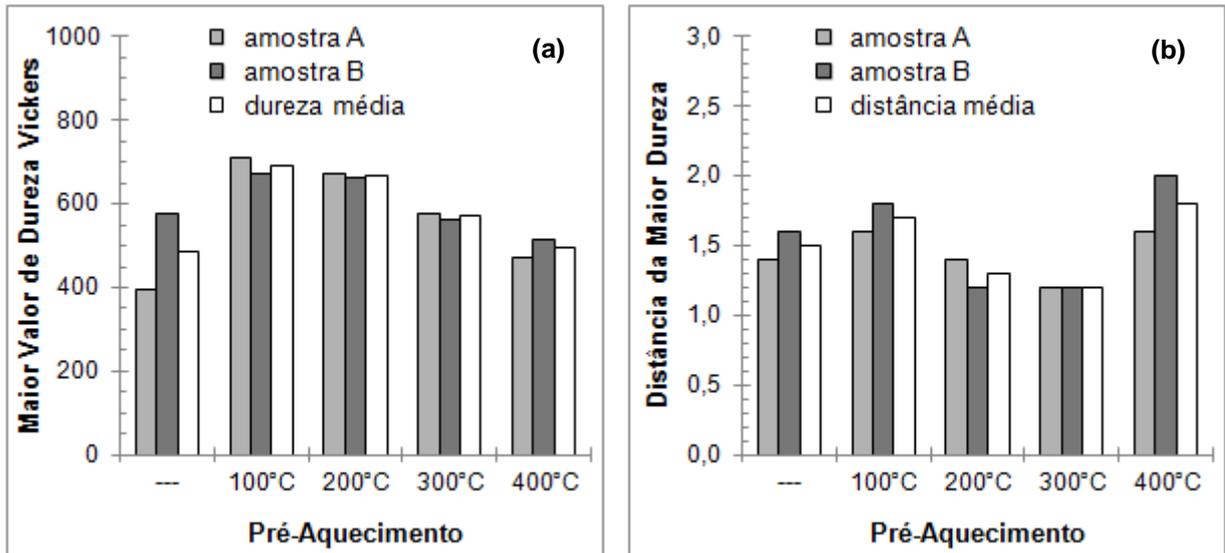
Figura 5.44 – Valores de dureza mais elevados apresentados após soldagem em um passe com eletrodo Ni acompanhados da distância na qual aparecem.



(a) Dureza e (b) Distância.

Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 5.45 – Valores de dureza mais elevados apresentados após soldagem em dois passes com eletrodo Ni acompanhados da distância na qual aparecem.



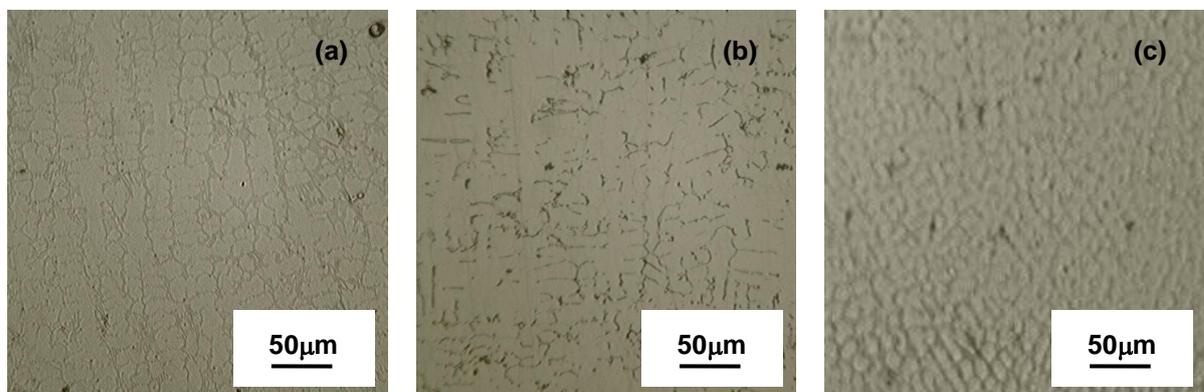
(a) Dureza e (b) Distância.

Fonte: Produzido pelo autor.

5.4. Microestrutura dos Corpos de Prova Soldados

Na Figura 5.46 são mostradas as fotomicrografias das zonas fundidas ZF do ferro fundido nodular com deposição de cordão de solda em um passe, com eletrodo FeNi, sem pré-aquecimento e com pré-aquecimento a 200°C e a 400°C. Observa-se que na condição sem pré-aquecimento a microestrutura é formada por ferrita em espinha ou vermicular e austenita e com pré-aquecimento há a presença de ferrita eutética mais austenita.

Figura 5.46 – Micrografias da zona fundida do ferro fundido nodular soldado com eletrodo FeNi – corpo de prova soldado em um passe.



(a) sem pré-aquecimento, (b) pré-aquecimento 200°C e (c) pré-aquecimento 400°C.

Fonte: Produzido pelo autor.

As fotomicrografias das demais regiões do material soldado em um passe com eletrodo FeNi sem pré-aquecimento e com pré-aquecimento a 200°C e a 400°C são exibidas nas Figuras 5.47 a 5.49. Verifica-se que as imagens se referem à zona fundida e a zona termicamente afetada em diferentes ampliações, (a) e (b); ao detalhamento da ZTA, (c) e (d); a constituintes microestruturais específicos, (e), (f) e (g); e às regiões que seriam mais distantes, (h) e (i), equivalendo ao metal de base MB.

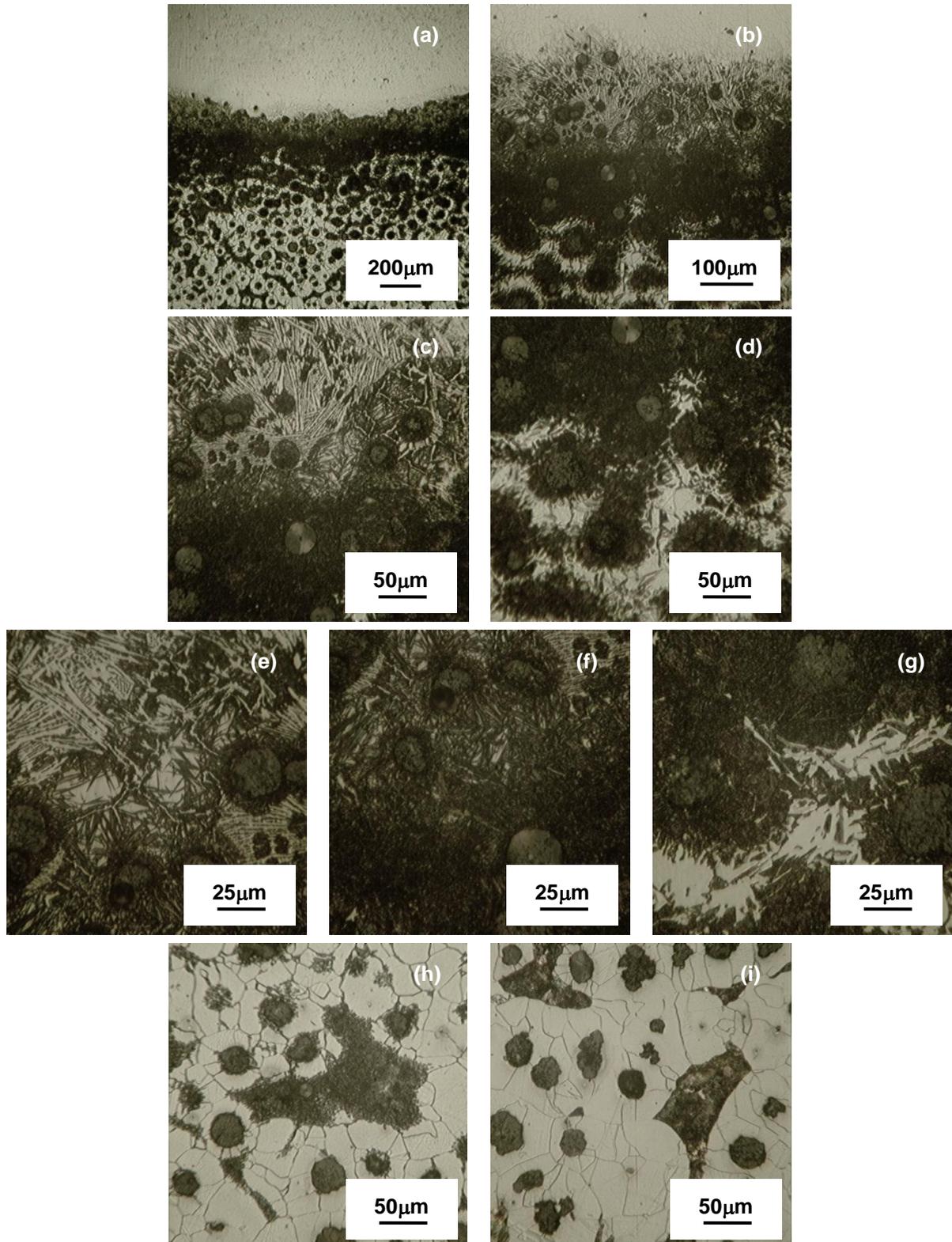
Considerando inicialmente o ferro fundido soldado sem pré-aquecimento, observa-se a ocorrência da ZTA composta de basicamente três regiões microestruturais distintas ((Figura 5.47(a) e (b)). A primeira, mais próxima à ZF, é possivelmente uma zona de transição na qual houve fusão parcial, caracterizada pela presença de

porções que parecem ser de ledeburita e cementita com ainda agulhas de martensita, além dos nódulos de grafita (Figura 5.47(c)). Trata-se da zona parcialmente fundida mencionada na Figura 3.25. Para efeitos de análise, neste trabalho será mencionada como parte da ZTA. A segunda surge com a ocorrência acentuada de estrutura martensítica e grafita (Figura 5.47(c)). A terceira aparece com a presença de perlita e ferrita envolvendo os nódulos de grafita, esses últimos com a morfologia alterada na interface com a matriz (Figura 5.47(d)). Os detalhes dos microconstituintes mencionados para as três regiões podem ser verificados na Figura 5.47(e), (f) e (g). Por fim, o metal de base, composto dos nódulos de grafita em uma matriz ferrítica perlítica, predominantemente ferrítica, é mostrado na Figura 5.47(h) e (i). Neste caso, duas regiões são exibidas: uma mais próxima à ZTA, com a morfologia da perlita e da interface de alguns nódulos ligeiramente alterada (Figura 5.47(h)) sendo, dessa forma, não exatamente o metal de base; e a outra realmente semelhante ao material no estado inicial.

O pré-aquecimento a 200°C do ferro fundido nodular soldado em um passe com eletrodo FeNi parece ter levado a alterações microestruturais em relação à liga metálica sem pré-aquecimento (Figura 5.48). Observa-se a ocorrência de uma ZTA com aparentemente a mesma extensão (Figura 5.48(a) e (b)) da amostra anterior, porém com formação menos acentuada de ferro fundido branco, caracterizada pela presença também das três regiões: a de transição, com ledeburita, cementita, martensita e nódulos de grafita; a com estrutura predominantemente martensítica (com a grafita); e a terceira, com os nódulos de grafita, ferrita e perlita de morfologia alterada ((Figura 5.48(c) e (d)). As regiões apontadas como do metal de base também se mostram similares àquelas do material sem pré-aquecimento (Figura (h) e (i)).

A realização de pré-aquecimento a 400°C parece ter inibido ainda mais a formação de ledeburita na microestrutura do material (Figura 5.49). Neste caso, a ZTA ocorre de forma mais extensa que as demais (Figura 5.49(a) e (b)), especialmente em termos da região com estrutura predominantemente martensítica e da região com a matriz de ferrita e perlita com morfologia alterada (Figura 5.49(c) e (d)). Os microconstituintes, assim com as imagens associadas ao metal de base, são, entretanto, similares.

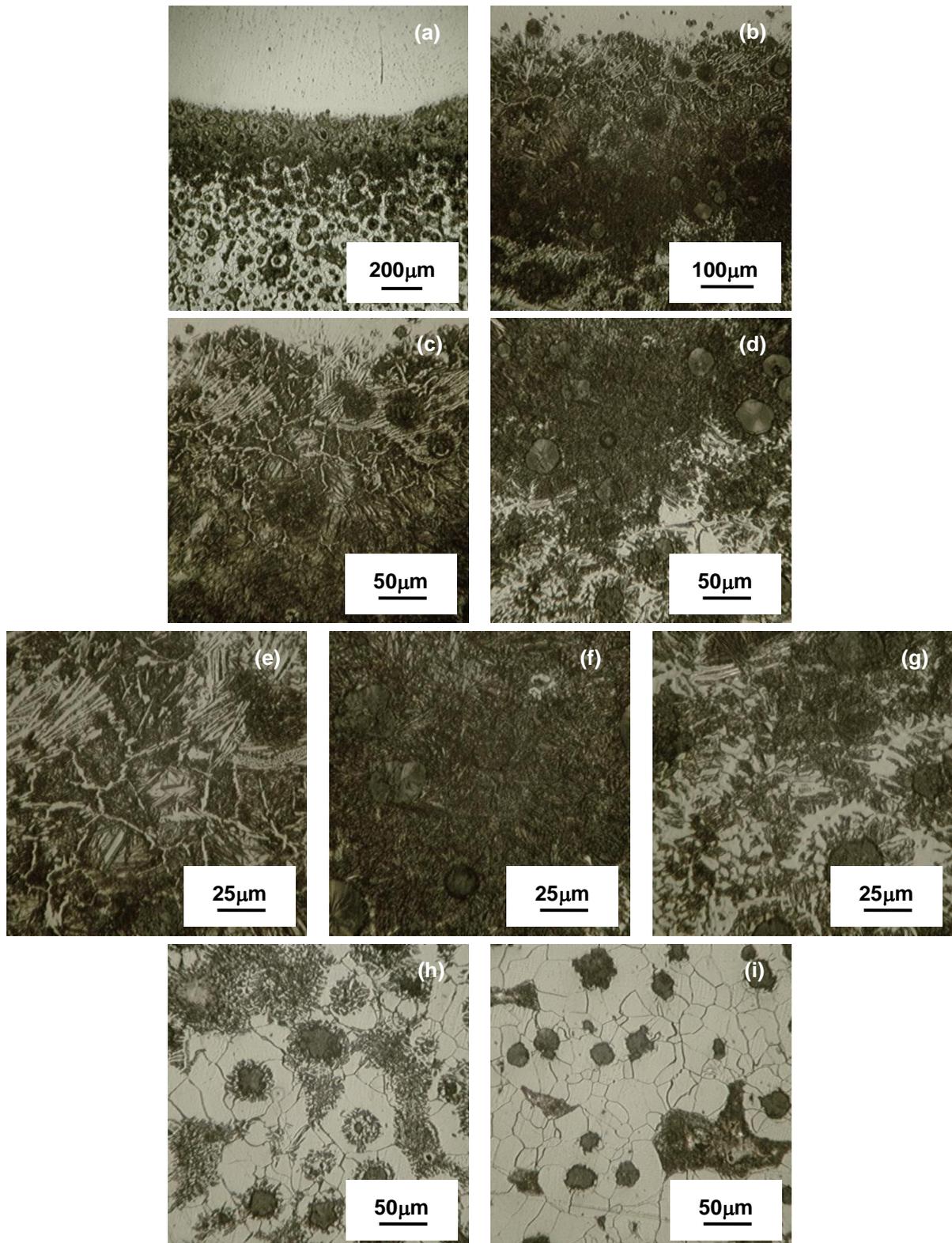
Figura 5.47 – Micrografias do ferro fundido nodular soldado com eletrodo FeNi sem pré-aquecimento – corpo de prova soldado em um passe.



(a) e (b) ZTA em diferentes ampliações; (c) e (d) ZTA - duas regiões; (e), (f) e (g) ZTA - detalhes dos microconstituintes; (h) MB próxima a ZTA e (i) MB distante da ZTA.

Fonte: Produzido pelo autor.

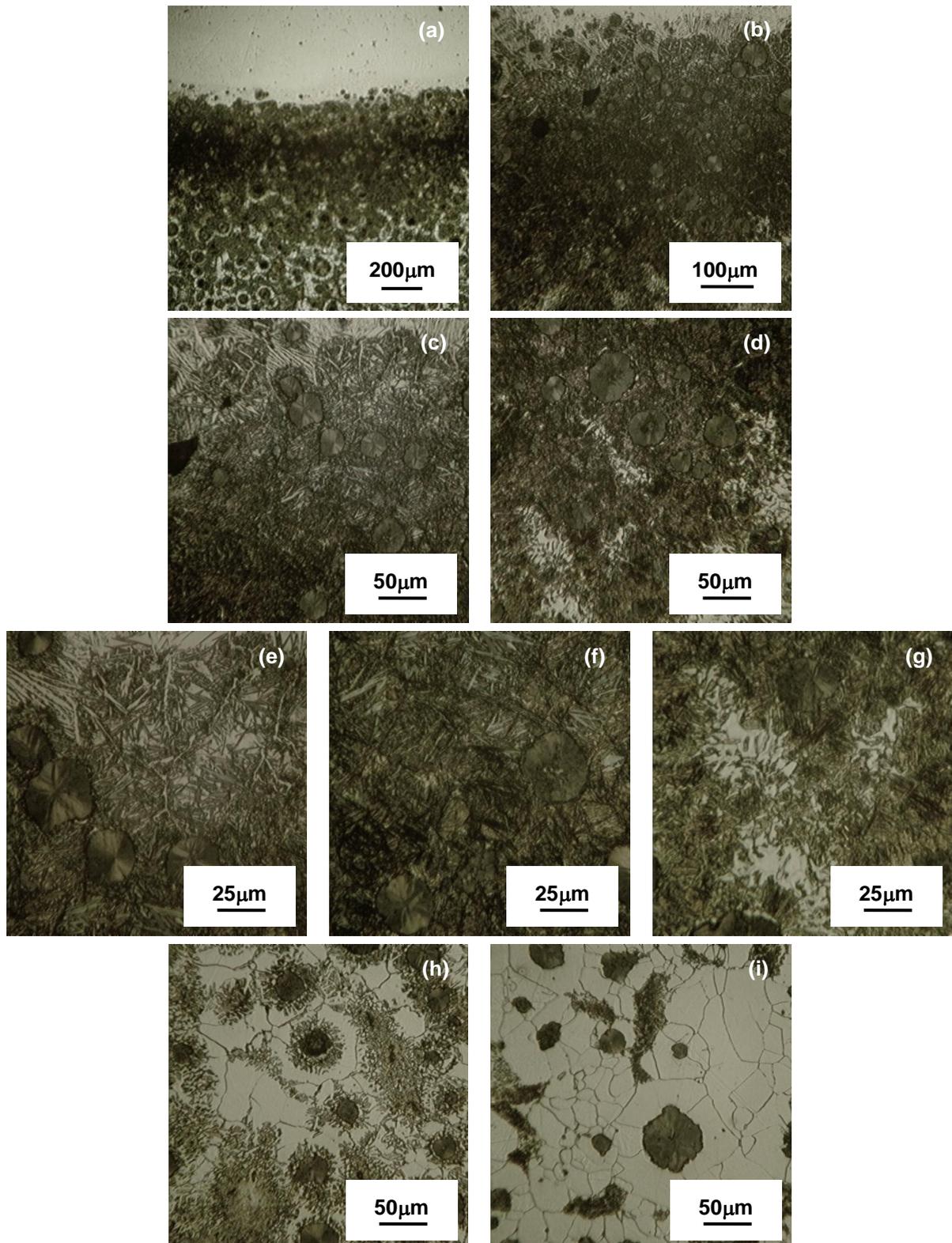
Figura 5.48 – Micrografias do ferro fundido nodular soldado com eletrodo FeNi com pré-aquecimento de 200°C – corpo de prova soldado em um passe.



(a) e (b) ZTA em diferentes ampliações; (c) e (d) ZTA - duas regiões; (e), (f) e (g) ZTA - detalhes dos microconstituintes; (h) MB próxima a ZTA e (i) MB distante da ZTA.

Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 5.49 – Micrografias do ferro fundido nodular soldado com eletrodo FeNi com pré-aquecimento de 400°C – corpo de prova soldado em um passe.

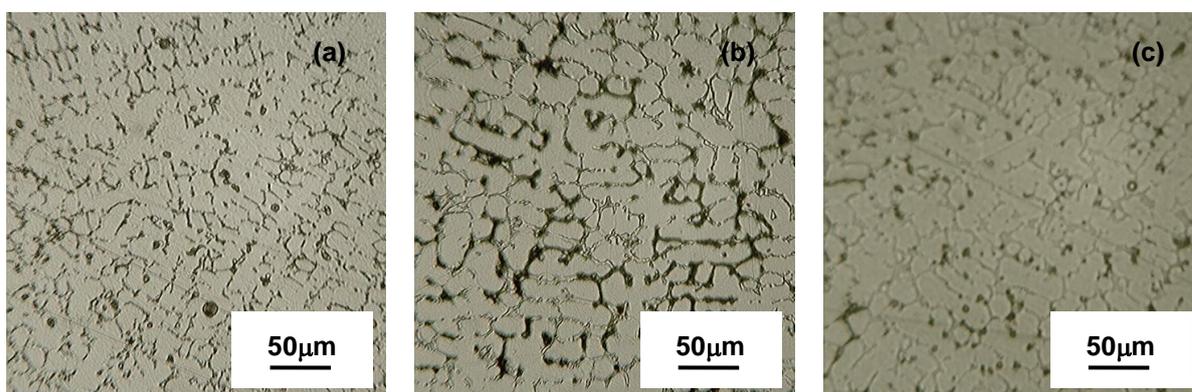


(a) e (b) ZTA em diferentes ampliações; (c) e (d) ZTA - duas regiões; (e), (f) e (g) ZTA - detalhes dos microconstituintes; (h) MB próxima a ZTA e (i) MB distante da ZTA.

Fonte: Produzido pelo autor.

As imagens das zonas fundidas do ferro fundido nodular com deposição de cordão de solda em dois passes, também com eletrodo FeNi, sem pré-aquecimento e com pré-aquecimento a 200°C e a 400°C são exibidas na Figura 5.50. Novamente pode ser verificada a ocorrência de ferrita eutética e austenita.

Figura 5.50 – Micrografias da zona fundida do ferro fundido nodular soldado com eletrodo FeNi – corpo de prova soldado em dois passes.



(a) sem pré-aquecimento, (b) pré-aquecimento 200°C e (c) pré-aquecimento 400°C.

Fonte: Produzido pelo autor.

Nas Figuras 5.51 a 5.53 são apresentadas as demais fotomicrografias do ferro fundido nodular soldado em dois passes com eletrodo FeNi, sem pré-aquecimento e com pré-aquecimento a 200°C e a 400°C. Percebe-se que, em comparação com as Figuras 5.47 a 5.49, mais imagens são empregadas para caracterizar o material. Dessa forma, a ZTA como um todo em diferentes ampliações ((a), (b) e (c)), seu detalhamento ((d), (e) e (f)), os microconstituintes ((g), (h) e (i)) e o metal de base ((j) e (k)) são exibidos.

Observando o material soldado em dois passes sem pré-aquecimento (Figura 5.51), verifica-se que a zona termicamente afetada aparece mais extensa (Figura 5.51(a), (b) e (c)) do que aquela mostrada no ferro fundido soldado em um passe. Apesar da ocorrência dos mesmos constituintes, percebe-se que há uma menor formação de ledeburita. Na região na qual a estrutura é predominantemente martensítica e a região com a matriz ferrítica e perlítica são mais acentuadas em termos de largura

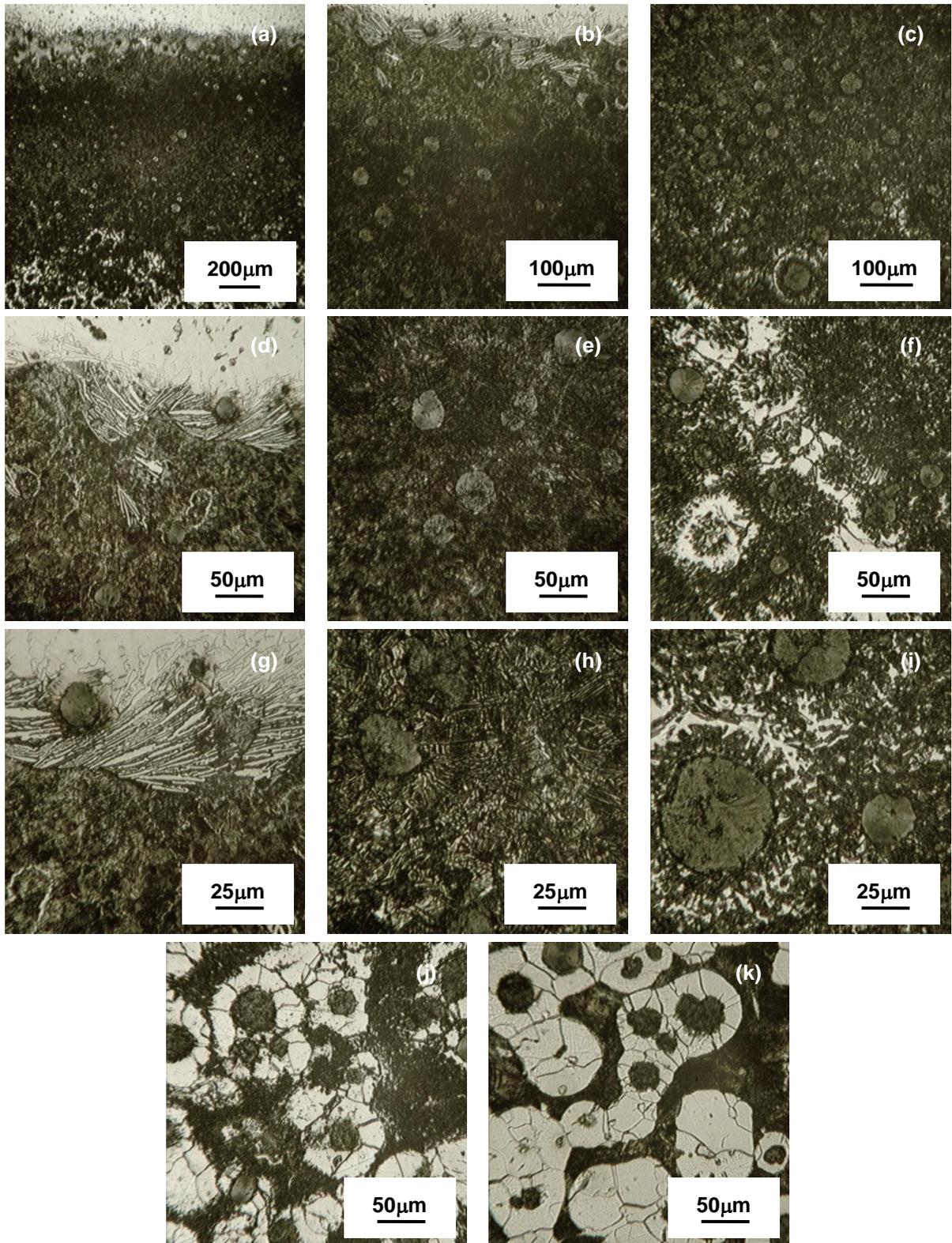
do que havia sido constatado anteriormente, não sendo possível verificar mudanças pronunciadas na região de transição.

De maneira análoga ao que foi verificado pelo material com deposição de cordão de solda em um passe, o pré-aquecimento a 200°C (Figura 5.52) parece ter levado a alterações microestruturais significativas em relação a menor quantidade de ledeburita formada, apresentando, no entanto, assim como o material sem pré-aquecimento, ZTA mais extensa que a liga soldada em um passe, mais uma vez em termos de estrutura martensítica e matriz ferrítica perlítica.

O ferro fundido nodular com deposição de cordão de solda em dois passes com pré-aquecimento a 400°C (Figura 5.53), assim como foi observado para o material soldado em apenas um passe, exibiu ZTA mais extensa (Figura 5.53(a), (b) e (c)) que as condições sem pré-aquecimento e com pré-aquecimento a 200°C. Novamente as regiões verificadas, considerando as estruturas formadas, são análogas às anteriores. Em relação à deposição de cordão de solda em um ou dois passes, foi verificado que a zona termicamente afetada seria mais acentuada para a segunda situação.

Na Figura 5.54 são mostradas as fotomicrografias das zonas fundidas do ferro fundido nodular com deposição de cordão de solda em um passe com eletrodo Ni sem pré-aquecimento e com pré-aquecimento a 200°C e a 400°C. Similarmente ao que foi observado para a liga soldada com o eletrodo FeNi, para as três condições a microestrutura é aparentemente semelhante, com presença de ferrita eutética e austenita.

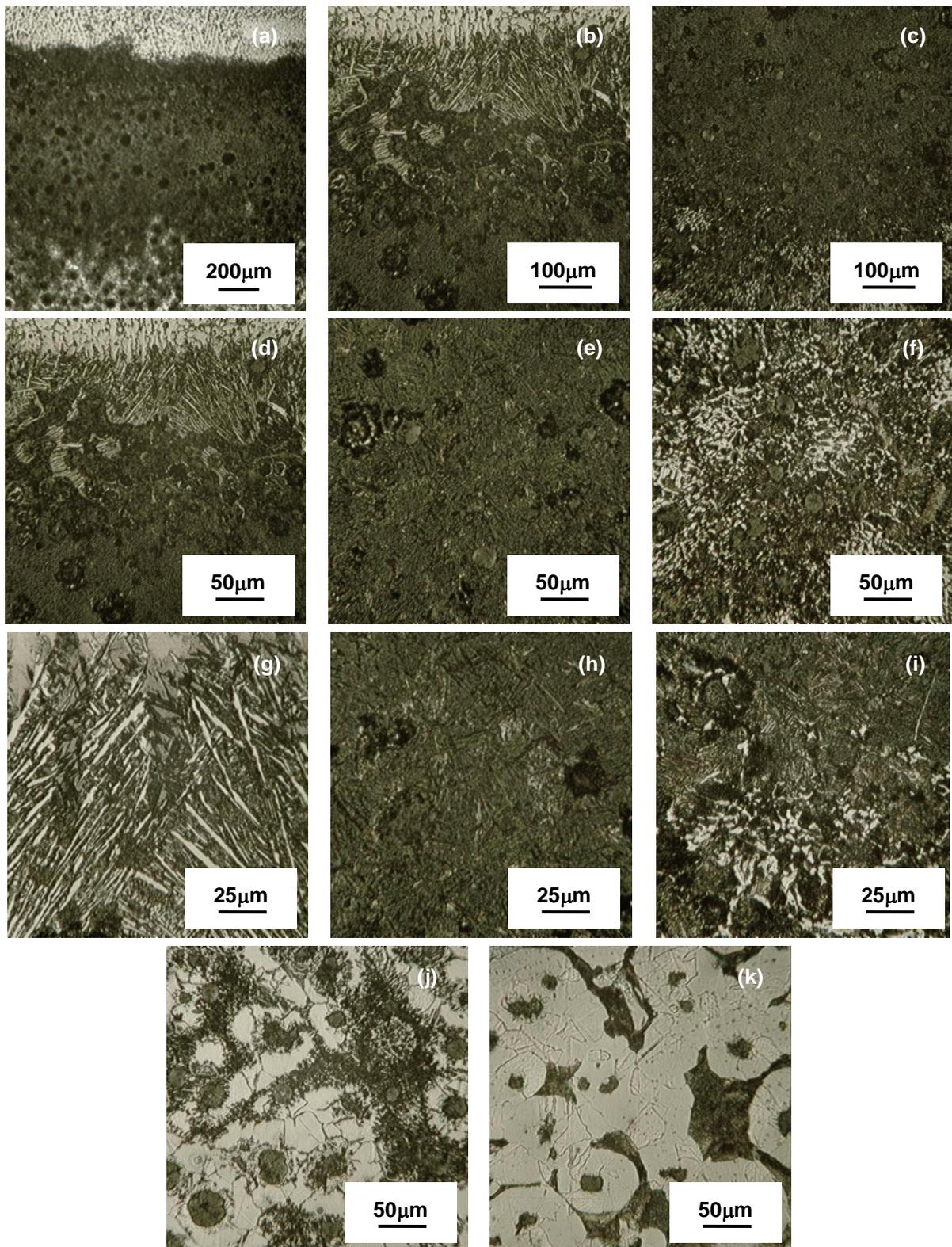
Figura 5.51 – Micrografias do ferro fundido nodular soldado com eletrodo FeNi sem pré-aquecimento – corpo de prova soldado em dois passes.



(a) ZTA; (b) e (c) ZTA – duas regiões; (d), (e) e (f) ZTA - três regiões; (g), (h) e (i) ZTA - detalhes dos microconstituintes; (j) MB próxima a ZTA e (k) MB distante da ZTA.

Fonte: Produzido pelo autor.

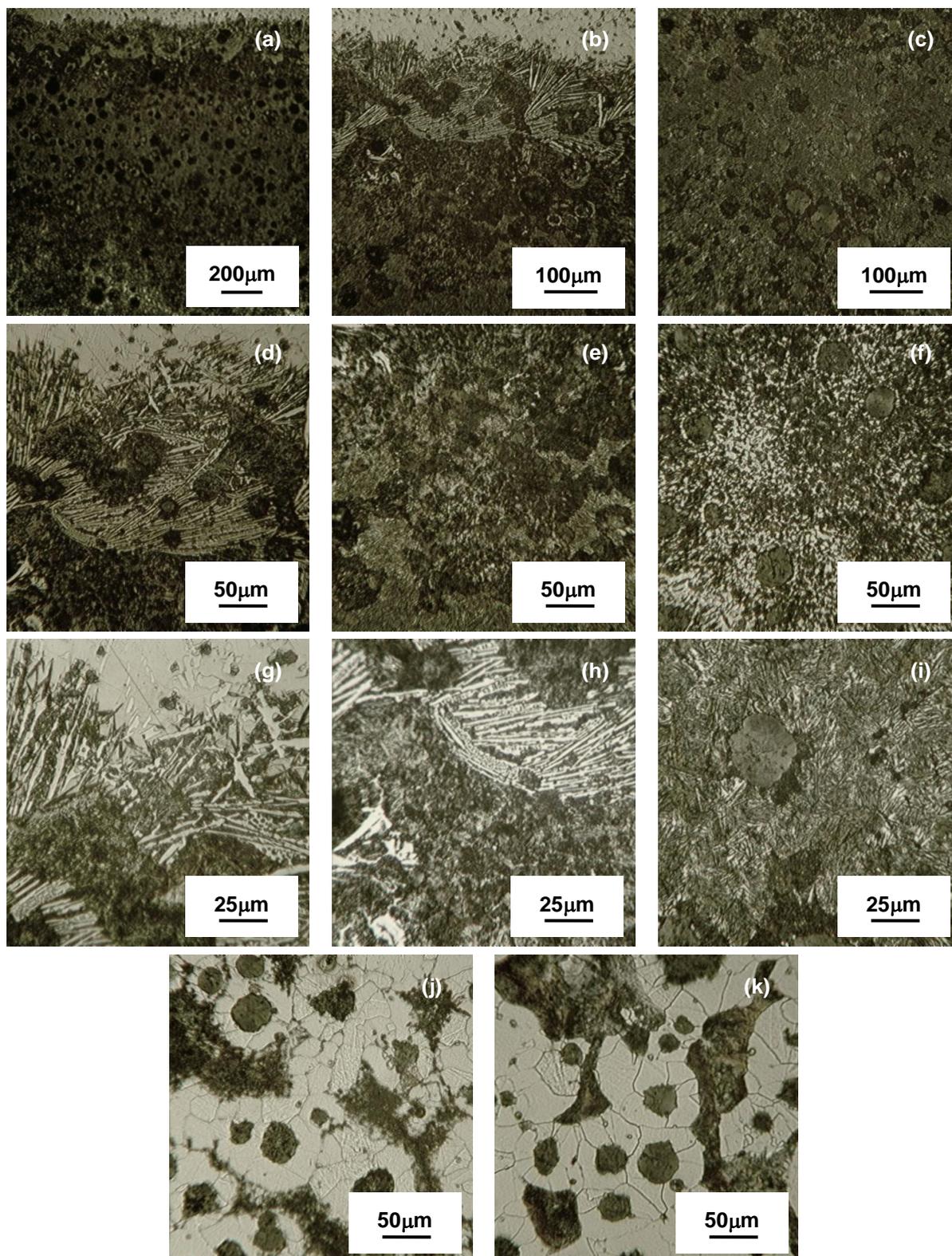
Figura 5.52 – Micrografias do ferro fundido nodular soldado com eletrodo FeNi com pré-aquecimento de 200°C – corpo de prova soldado em dois passes.



(a) ZTA; (b) e (c) ZTA – duas regiões; (d), (e) e (f) ZTA - três regiões; (g), (h) e (i) ZTA - detalhes dos microconstituintes; (j) MB próxima a ZTA e (k) MB distante da ZTA.

Fonte: Produzido pelo autor.

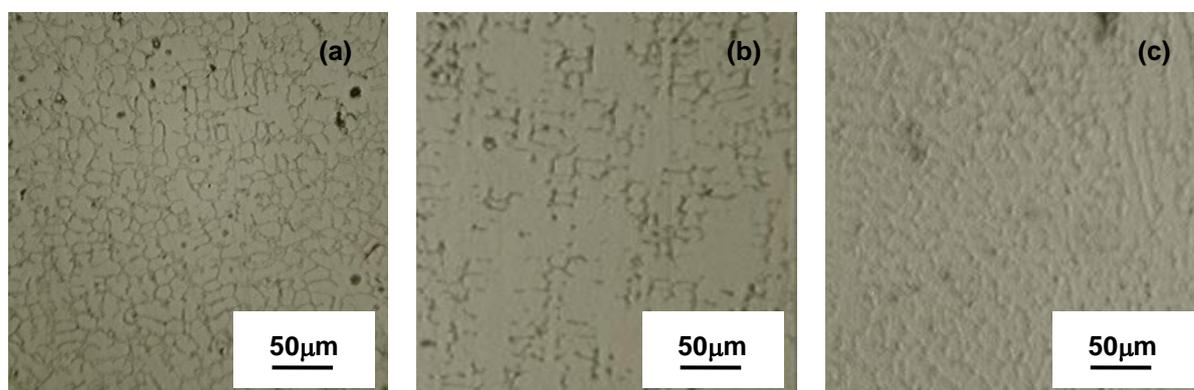
Figura 5.53 – Micrografias do ferro fundido nodular soldado com eletrodo FeNi com pré-aquecimento de 400°C – corpo de prova soldado em dois passes.



(a) ZTA; (b) e (c) ZTA – duas regiões; (d), (e) e (f) ZTA - três regiões; (g), (h) e (i) ZTA - detalhes dos microconstituintes; (j) MB próxima a ZTA e (k) MB distante da ZTA.

Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 5.54 – Micrografias da zona fundida do ferro fundido nodular soldado com eletrodo Ni – corpo de prova soldado em um passe.



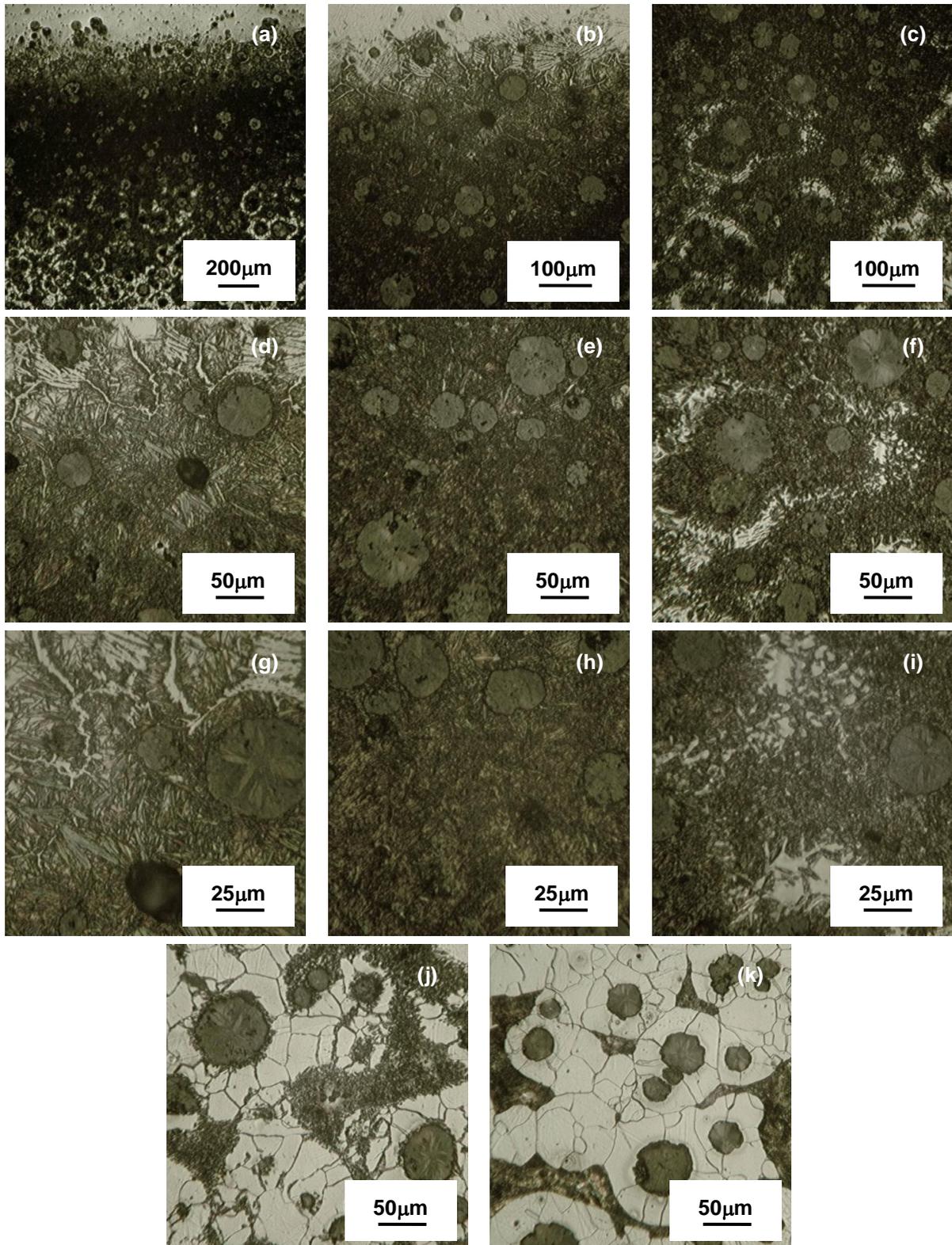
(a) sem pré-aquecimento, (b) pré-aquecimento 200°C e (c) pré-aquecimento 400°C.

Fonte: Produzido pelo autor.

As fotomicrografias relativas às demais regiões do ferro fundido soldado em um passe com eletrodo Ni são exibidas nas Figuras 5.55 a 5.57. A sequência das imagens segue o mesmo padrão adotado para analisar as figuras anteriores: ZF e ZTA ((a), (b) e (c)); detalhamento da ZTA ((d), (e) e (f)); constituintes específicos ((g), (h) e (i)) e MB ((j) e (k)).

De maneira geral, considerando as três condições avaliadas, sem pré-aquecimento e com pré-aquecimento a 200°C e a 400°C, observa-se que os constituintes presentes na ZTA, além dos nódulos de grafita, foram basicamente: martensita (região de transição), martensita, perlita e grafita (segunda região) e ferrita e perlita (terceira região). Quanto ao metal de base, verifica-se que o mesmo se mostrou composto inicialmente por ferrita e perlita com lamelas alteradas e ferrita e perlita de morfologia próxima à da liga no estado inicial. Comparando os resultados com aqueles obtidos no material soldado com eletrodo FeNi, entretanto, diferenças acentuadas podem ser observadas. A extensão da ZTA para as três situações é maior com o emprego do eletrodo Ni. Em adição a este fato, verifica-se que neste caso a região apontada como de transição na ZTA é muito mais discreta, assim como a presença do constituinte ledeburita, que não é observado, sobretudo na situação de pré-aquecimento a 400°C .

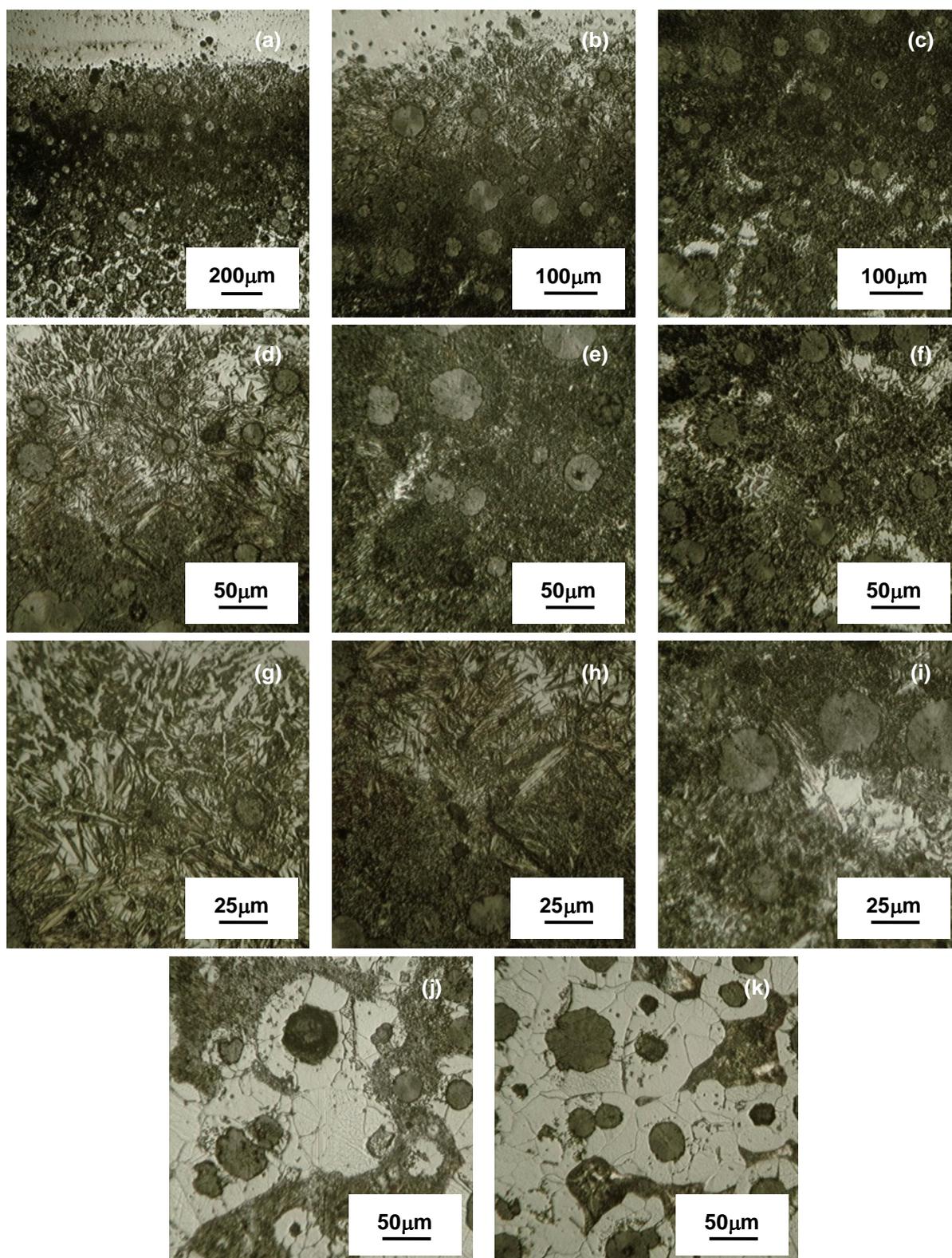
Figura 5.55 – Micrografias do ferro fundido nodular soldado com eletrodo Ni sem pré-aquecimento – corpo de prova soldado em um passe.



(a) ZTA; (b) e (c) ZTA – duas regiões; (d), (e) e (f) ZTA - três regiões; (g), (h) e (i) ZTA - detalhes dos microconstituintes; (j) MB próxima a ZTA e (k) MB distante da ZTA.

Fonte: Produzido pelo autor.

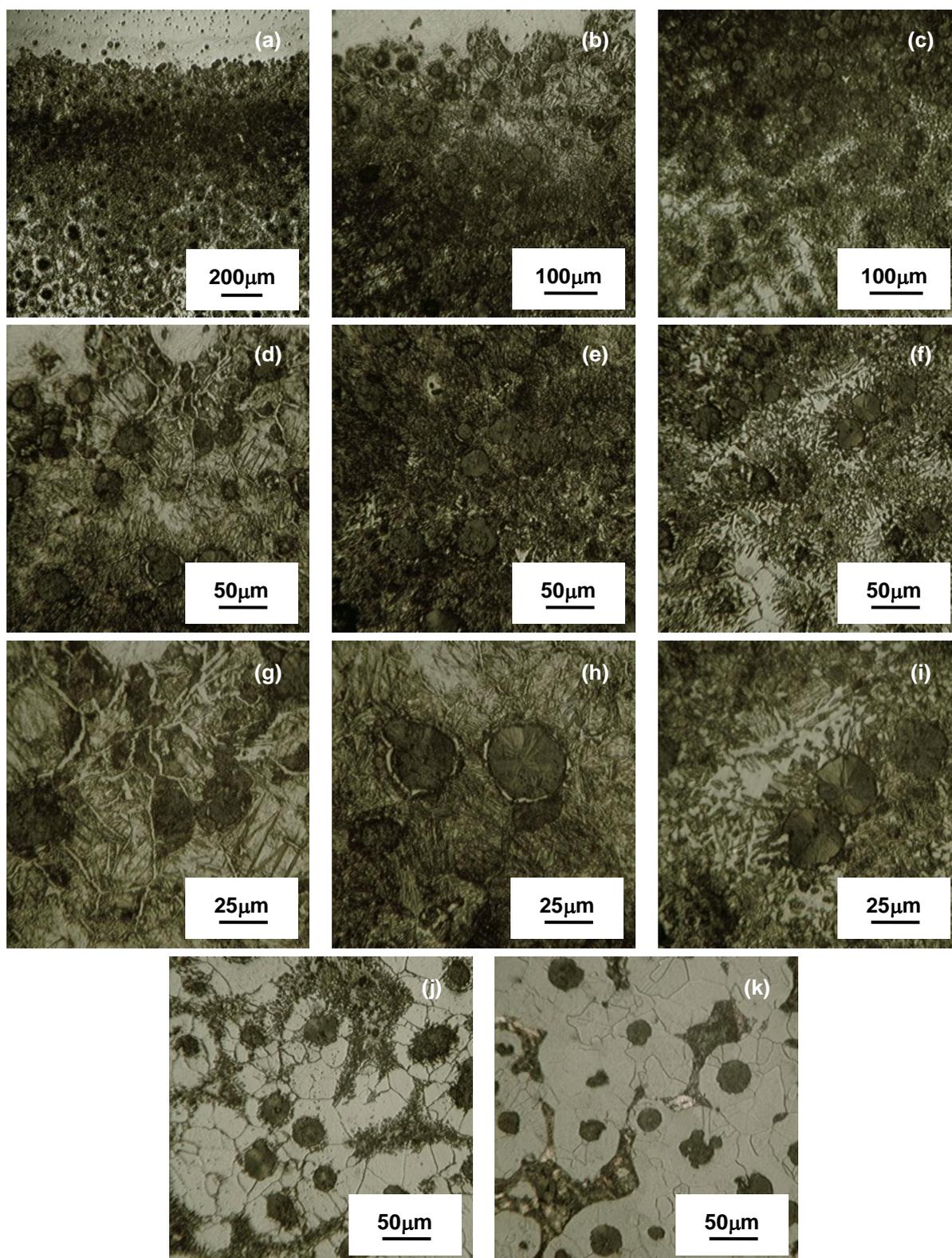
Figura 5.56 – Micrografias do ferro fundido nodular soldado com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 200°C – corpo de prova soldado em um passe.



(a) ZTA; (b) e (c) ZTA – duas regiões; (d), (e) e (f) ZTA - três regiões; (g), (h) e (i) ZTA - detalhes dos microconstituintes; (j) MB próxima a ZTA e (k) MB distante da ZTA.

Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 5.57 – Micrografias do ferro fundido nodular soldado com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 400°C – corpo de prova soldado em um passe.

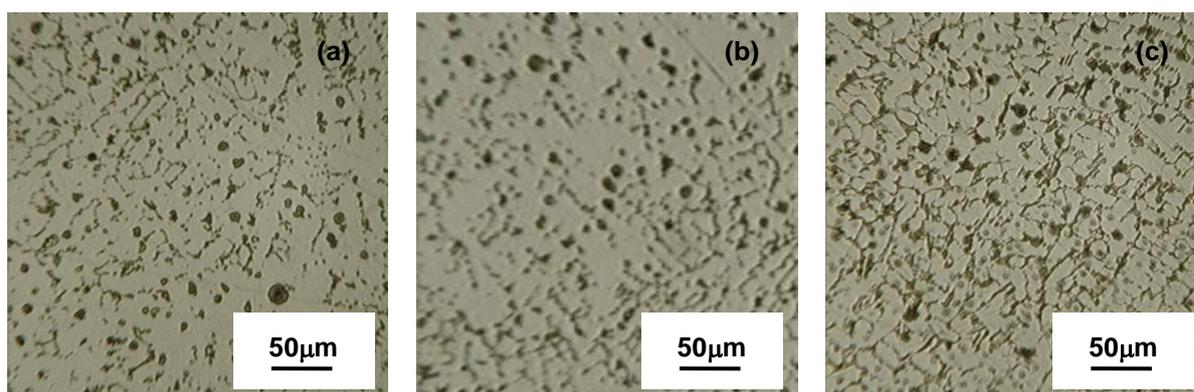


(a) ZTA; (b) e (c) ZTA – duas regiões; (d), (e) e (f) ZTA - três regiões; (g), (h) e (i) ZTA - detalhes dos microconstituintes; (j) MB próxima a ZTA e (k) MB distante da ZTA.

Fonte: Produzido pelo autor.

Na Figura 5.58 são apresentadas as imagens das zonas fundidas do ferro fundido nodular com deposição de cordão de solda em dois passes empregando eletrodo Ni. A presença de ferrita eutética e austenita pode ser verificada.

Figura 5.58 – Micrografias da zona fundida do ferro fundido nodular soldado com eletrodo Ni – corpo de prova soldado em dois passes.



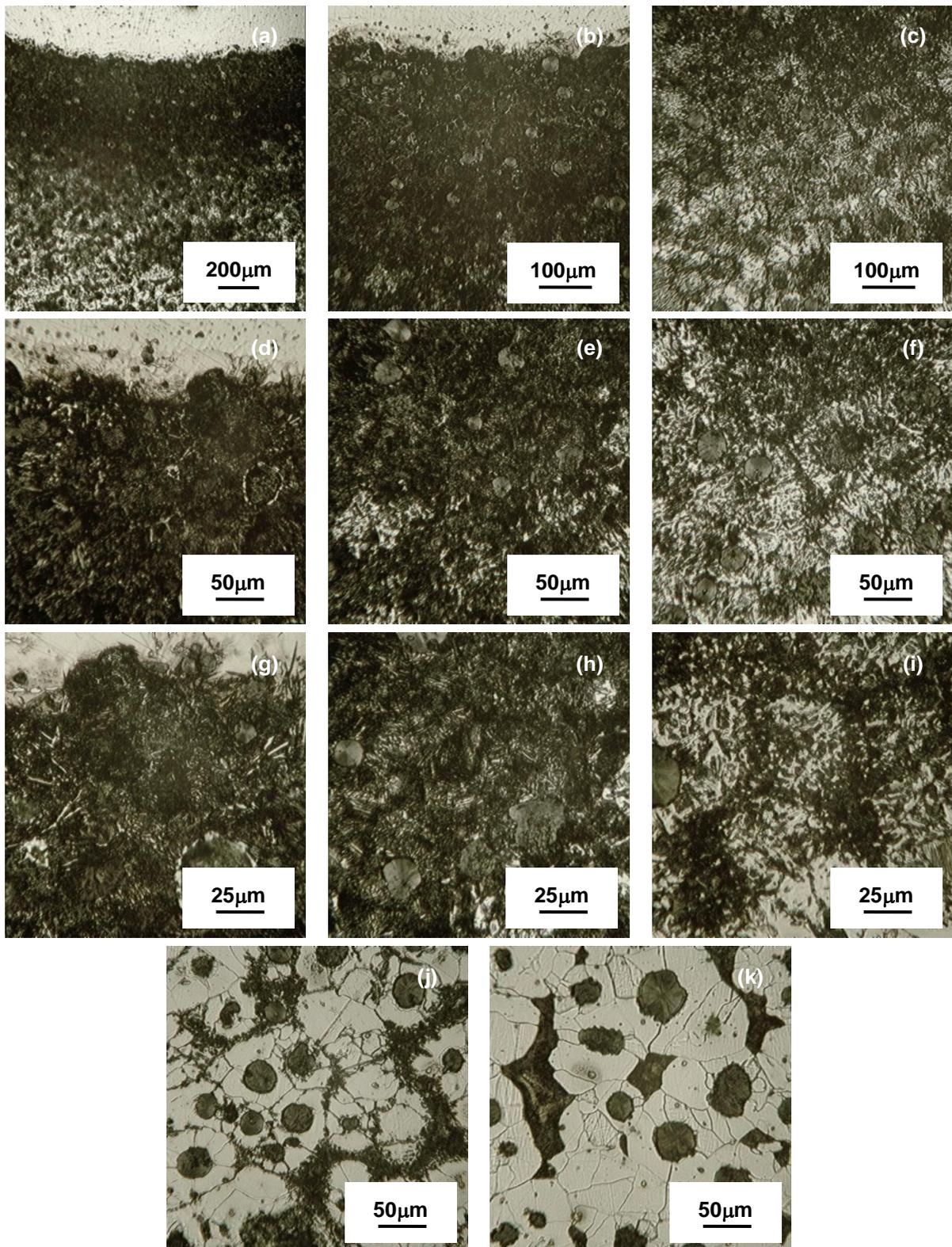
(a) sem pré-aquecimento, (b) pré-aquecimento 200°C e (c) pré-aquecimento 400°C.

Fonte: Produzido pelo autor.

Nas Figuras 5.59 a 5.61 são exibidas as fotomicrografias do ferro fundido nodular soldado em dois passes com eletrodo Ni. Em relação ao material soldado em um passe nas mesmas condições, observa-se aumento na extensão da ZTA, porém menos acentuado do que foi verificado para o eletrodo FeNi ao passar de um para dois passes. Considerando os microconstituintes desenvolvidos, as estruturas são similares, com exceção da chamada região de transição da ZTA, que é praticamente nula e não se observa a ocorrência de ledeburita.

Por fim, pode-se observar que a utilização de mais de um passe teve um efeito mais relevante do que o pré-aquecimento em relação a inibir o aparecimento da uma estrutura típica de ferro fundido branco.

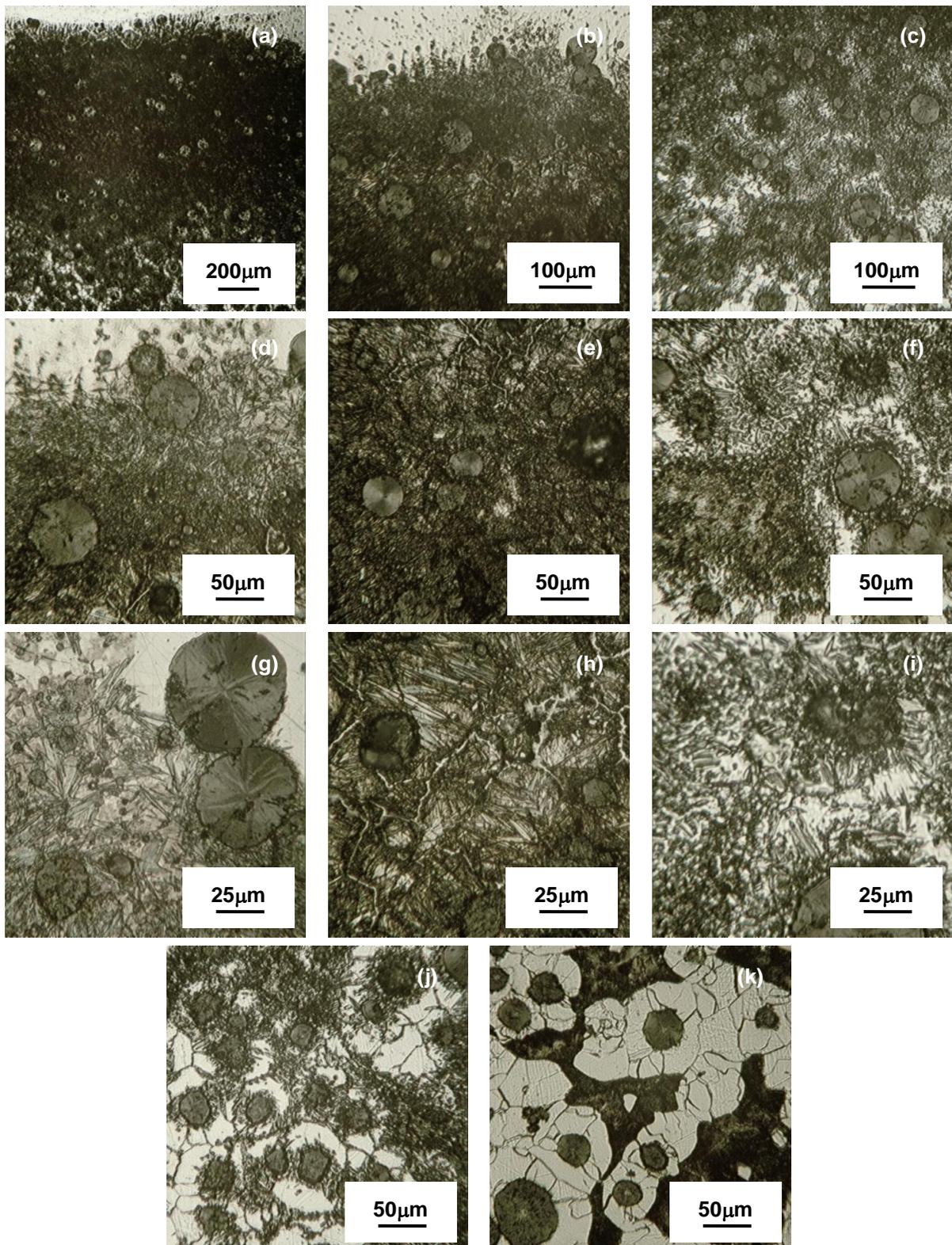
Figura 5.59 – Micrografias do ferro fundido nodular soldado com eletrodo Ni sem pré-aquecimento – corpo de prova soldado em dois passes.



(a) ZTA; (b) e (c) ZTA – duas regiões; (d), (e) e (f) ZTA - três regiões; (g), (h) e (i) ZTA - detalhes dos microconstituintes; (j) MB próxima a ZTA e (k) MB distante da ZTA.

Fonte: Produzido pelo autor.

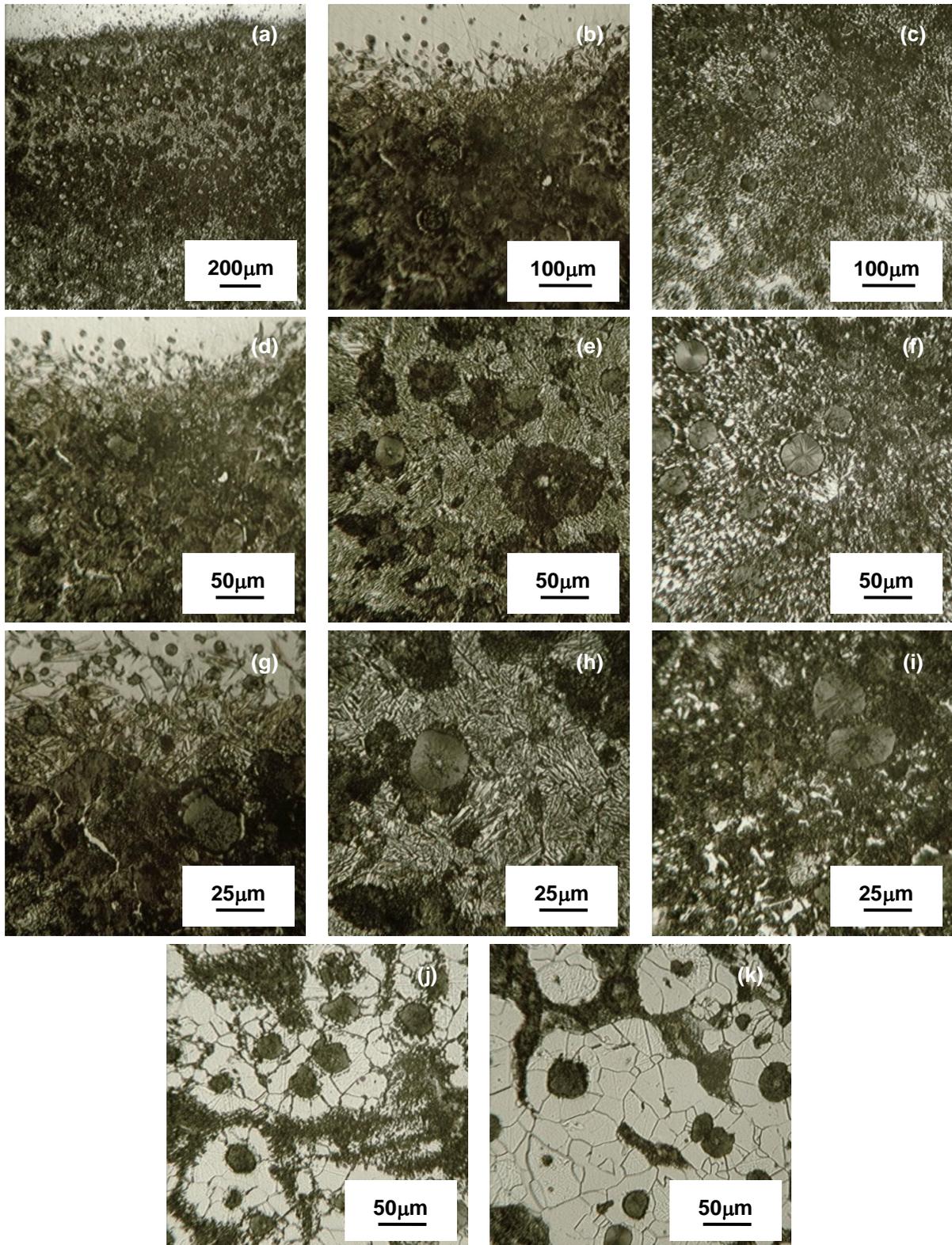
Figura 5.60 – Micrografias do ferro fundido nodular soldado com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 200°C – corpo de prova soldado em dois passes.



(a) ZTA; (b) e (c) ZTA – duas regiões; (d), (e) e (f) ZTA - três regiões; (g), (h) e (i) ZTA - detalhes dos microconstituintes; (j) MB próxima a ZTA e (k) MB distante da ZTA.

Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 5.61 – Micrografias do ferro fundido nodular soldado com eletrodo Ni com pré-aquecimento de 400°C – corpo de prova soldado em dois passes.



(a) ZTA; (b) e (c) ZTA – duas regiões; (d), (e) e (f) ZTA - três regiões; (g), (h) e (i) ZTA - detalhes dos microconstituintes; (j) MB próxima a ZTA e (k) MB distante da ZTA.

Fonte: Produzido pelo autor.

6. CONCLUSÕES

Em função dos resultados, é possível chegar às seguintes conclusões:

- os dois consumíveis testados, eletrodo de ferro níquel e níquel puro, possibilitaram cordões de solda com boa aparência, sem a ocorrência de descontinuidades tais como: mordedura, poros, trincas, dentre outros;
- o método de caracterização por macrografia não apresentou bons resultados, sobretudo em função de não possibilitar a visualização de sua extensão de forma clara em todos os corpos de prova;
- os ensaios de dureza possibilitaram a identificação de alterações significativas de dureza, confirmando o aparecimento de fases com dureza em torno de 600HV, conseqüentemente fragilizando o material.
- a caracterização por micrografia foi a técnica mais eficiente, permitindo perceber a relevância do pré-aquecimento e da utilização de dois passes na inibição da formação de uma estrutura típica de ferro fundido branco;
- por fim, foi observado que a utilização de deposição de cordão de solda em dois passes foi mais relevante do que a utilização do pré-aquecimento para minimizar ou evitar a formação de uma estrutura típica de ferro fundido branco.

7. REFERÊNCIAS

ASM HANDBOOK. **Metallography and microstructures**. Ohio: ASM International, 2004. 1184p.

ASM HANDBOOK. **Welding, brazing, and soldering**. 10 ed. Ohio: ASM International, 1993. 1299p.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 590p.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais ABM, 2005. 599p.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4 ed. São Paulo: Blücher, 2008. 672p.

COUTINHO, C. B. **Materiais metálicos para engenharia**. Belo Horizonte: FCO, 1992. 405p.

EL-BANNA, E.M.; NAGEDA, M.S.; EL-SAADAR, M.M. Study of restoration by welding of perlitic ductile cast iron. **Materials Letters**, v. 42, n. 2, p. 311-320, 2000.

ESAB. **Eletrodos revestidos ok**. ESAB, 2005. 64p. Disponível em <http://www.esab.com.br/br/por/instrucao/apostilas/upload/1901097rev0_apostilaeletrodosrevestidos.pdf> Acesso em 15/12/2012.

EUTECTIC CASTOLIN. **Manual de aplicações em soldagem**. 2 ed. Eutectic Castolin do Brasil Ltda, 2009. 364p.

GONZAGA, R. A. Influence of ferrite and pearlite content on the mechanical properties of ductile cast irons. **Materials Science and Engineering A**, v. 567, p. 1-8, 2013.

GUESSER, W. L. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos**. São Paulo: Blücher, 2009. 344p.

KRAUSS, G. **Steels: Heat Treatment and Processing Principles**. Chicago: ASM International, 1990. 497p.

LABRECQUE, C.; GAGNÉ, M. Ductile iron: fifty years of continuous development. **Canadian Metallurgical Quarterly**, v. 37, n. 5, p. 343-378, 1998.

MACHADO, I.G. **Soldagem e técnicas conexas: processos**. Porto Alegre: Autor, 1996. 447 p.

MALUF, O. **Fadiga termodinâmica em ligas de ferro fundido cinzento para discos de freio automotivos**. São Carlos: Universidade Federal de São Paulo, 2007. 212p. (Tese, Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais).

MARQUES, P.V. **Tecnologia da soldagem**. Belo Horizonte: ESAB, 1991. 352p.

MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J.; BRACARENSE, A.Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3 ed. Belo Horizonte: UFMG, 2009. 362p.

MODENESI, P.J. **Terminologia usual de soldagem e símbolos de soldagem**. 2008.. Disponível em <<http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/terminologia.pdf>> Acesso em 27/04/2013.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade de algumas ligas metálicas**. 2008. Disponível em < <http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/soldabilidade.pdf> > Acesso em 27/04/2013.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B., **Introdução à metalurgia da soldagem**. 2011. 50p. Disponível em <www.demet.ufmg.br/grad/disciplinas/em019/index.html> Acesso em 15/12/2012.

PARIS, A. A. F. **Tecnologia da soldagem de ferros fundidos**. Santa Maria: UFSM, 2003. 140p.

PASCUAL, M.; FERRER, C.; RAYON, E. Weldability of spheroidal graphite ductile cast iron using Ni/Ni-Fe electrodes. **Revista de Metalurgia**, v. 45, n. 5, p. 334-338, 2009.

SANTANA, I.J.; CORRÊA, E.C.S.; RIBEIRO, D.M.B.; VAZ, C.T. Soldabilidade do ferro fundido nodular soldado pelo processo GMAW. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA ABM, 67., 2012, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABM, 2012.

SANTOS, A. B. S. **Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos e nodulares**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas IPT, 1991. 199p.

SANTOS, R.G. **Transformações de fase em materiais metálicos**. Campinas: UNICAMP, 2006. 432p.

WAINER, E.; BRANDI, S.D.; MELLO, F.D. **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1995. 494p.