



**I Curso de Especialização em Engenharia da Soldagem
Turma 2011 - CTA DEMEC-TC/UFPR**

FELIPE OWCZARZAK DE MELLO E SILVA

**ANÁLISE DE REVESTIMENTOS DE STELLITE E AÇO INOXIDÁVEL
MARTENSÍTICO POR WELD OVERLAY EM AÇO CARBONO E SUAS
CARACTERÍSTICAS METALÚRGICAS**

CURITIBA-PR

2013

FELIPE OWCZARZAK DE MELLO E SILVA

**ANÁLISE DE REVESTIMENTOS DE STELLITE E AÇO INOXIDÁVEL
MARTENSÍTICO POR WELD OVERLAY EM AÇO CARBONO E SUAS
CARACTERÍSTICAS METALÚRGICAS**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Especialista em Engenharia da Soldagem do curso de Especialização em Engenharia da Soldagem da Universidade Federal do Paraná, na área de concentração Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Paulo César Okimoto.

CURITIBA

2013

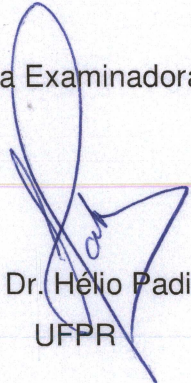
TERMO DE APROVAÇÃO

FELIPE OWCZARZAK DE MELLO E SILVA

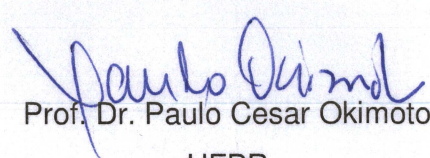
ANÁLISE DE REVESTIMENTOS DE STELLITE E AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO POR WELD OVERLAY EM AÇO CARBONO E SUAS CARACTERÍSTICAS METALÚRGICAS

Monografia aprovada como requisito parcial à obtenção de grau de Especialista em Engenharia da Soldagem, área de concentração Fabricação, no Curso de Especialização em Engenharia da Soldagem, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Banca Examinadora :


Prof. Dr. Hélio Padilha
UFPR


Prof. Dr. Ramon Sigifredo Cortés Paredes
UFPR


Prof. Dr. Paulo Cesar Okimoto
UFPR

Curitiba, 31 de outubro de 2013.

AGRADECIMENTOS

Aos amigos Rudek Júnior, Alexandre Salgado, Luiz Ferreira, Gustavo Gerkens, Paulo César Okimoto e Sérgio Luiz Henke, pela orientação, tempo, apoio e materiais disponibilizados, essenciais à este trabalho.

RESUMO

Revestimentos metálicos são usualmente empregados na proteção de equipamentos sujeitos a mecanismos de desgaste variados. O objetivo principal da aplicação é a redução de custos, evitando a construção do componente com o material resistente, e o prolongamento da vida útil. Na indústria petrolífera, componentes sujeitos a mecanismos de desgaste como erosão, abrasão e corrosão necessitam de revestimentos que apresentem desempenho efetivo contra tais mecanismos. O caso de uma redução em aço carbono ASTM A283 Gr. C, sujeito a H₂S úmido, abrasão e erosão, é estudado, onde revestimentos por weld overlay de Stellite e aço inoxidável martensítico são aplicados e avaliados em relação a suas propriedades químicas, dureza, microestrutura e problemas metalúrgicos derivados do procedimento de soldagem, assim como atendimento à norma NACE SP0296-2010, que define limites de dureza no metal de base para evitar danos por trincamento sob tensão por sulfetos devido ao H₂S úmido.

Palavras chave: revestimento, weld overlay, trincamento sob tensão por sulfetos, dureza, stellite, martensítico.

ABSTRACT

Metallic coatings are usually applied for equipment protection under a variety of wear mechanisms. The main objective for this application is the cost reduction, avoiding the construction of the component with the resistant material, and the extension of the life cycle. In the petroleum industry, components under wear mechanisms like erosion, abrasion and corrosion require coatings that present effective performance against such mechanisms. The case of an ASTM A283 Gr. C carbon steel reduction, exposed to wet H₂S, abrasion and erosion, is studied, where weld overlay coatings of Stellite and martensitic stainless steel are applied and evaluated related to its chemical properties, hardness, microstructure and metallurgic problems due welding procedure, as well as compliance to the NACE SP0296-2010 standard, which defines the hardness limits in the base metal to avoid sulfide stress crackin due wet H₂S.

Key-words: coating, weld overlay, sulfid stress cracking, hardness, stellite, martensitic.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Aplicação do revestimento no trecho inicial e redução.....	12
Figura 3.1 – Mecanismo de desgaste por abrasão.....	15
Figura 3.2 – Sistema de desgaste por adesão.....	16
Figura 3.3 – Sistema de desgaste por erosão.....	17
Figura 3.4 – Sistema de desgaste por fadiga.....	18
Figura 4.1 – Localização dos corpos de prova, indicando primeiro e último cordão do processo realizado. Os cortes mecânicos foram realizados ao longo das linhas pontilhadas.....	28
Figura 4.2 – Macrografias dos corpos de prova 1 (esquerda) e 2 (direita), gerados a partir da amostra “A”, com revestimento de uma camada em ECoCr-A.....	29
Figura 4.3 – Macrografias dos corpos de prova 3 (esquerda) e 4 (direita), gerados a partir da amostra “B”, com revestimento composto de primeira camada em de uma camada em E309-16 e segunda camada em RCoCr-A.....	29
Figura 4.4 – Macrografias do corpos de prova 5 (esquerda) e 6 (direita), gerados a partir da amostra “C”, com revestimento composto de uma camada em Eutectode 536.....	30
Figura 4.5 – Áreas de interesse dos corpos de prova para análise do metal de base, para cordões iniciais e finais.....	31
Figura 4.6 – Corpo de prova 1, imagens de micrografia (I) e (II) da linha de fusão com metal de base, região próxima da superfície superior do metal de base. Microestrutura evidenciada na imagem (II) apresenta grãos grosseiros, composta por perlita, ferrita e ferrita alinhada.....	32
Figura 4.7 – Corpo de prova 1, imagens de micrografia (I) e (II) da linha de fusão com metal de base, região da extremidade inferior do cordão. Região de refino de grão visível na imagem (I), à esquerda, por influência da ZTA do cordão subsequente. Microestrutura de grãos grosseiros evidenciada na imagem (II), próxima a um poro localizado na zona fundida, apresentando grande quantidade de ferrita alinhada. Manchas de oxidação são visualizadas, devido à umidade contida no poro.....	33
Figura 4.8 – Corpo de prova 1, imagens de micrografia (I) e (II) da linha de fusão com metal de base, região próxima da linha de fusão do segundo cordão. Região de refino de grão visível na imagem (I) e (II), por influência da ZTA do cordão subsequente. Também é visualizado manchas de oxidação próximas a um poro.....	34
Figura 4.9 – Corpo de prova 2, imagens de micrografia (I) e (II) da linha de fusão com metal de base, região próxima da superfície superior do metal de base. Microestrutura evidenciada na imagem (II) apresenta grãos grosseiros, composta por perlita, ferrita e ferrita alinhada, também visualizada nas demais regiões do metal de base ao longo da linha de fusão.....	35
Figura 4.10 – Corpo de prova 2, imagens de micrografia (I) e (II) da linha de fusão com metal de base, região da extremidade inferior do cordão. Microestrutura de grãos grosseiros em toda a extensão da imagem (I).....	36
Figura 4.11 – Corpo de prova 2, imagens de micrografia (I) e (II) da linha de fusão com metal de base, região próxima do penúltimo cordão. Microestrutura de grãos grosseiros em toda a extensão das imagens. Não existe região de refino de grão, justificado por não haver ciclo térmico devido a ausência de cordões posteriores.....	37
Figura 4.12 – Corpo de prova 1, imagens de micrografia (I) e (II) da zona fundida, região da linha de fusão próxima à superfície superior do metal de base, revestimento com Stellite ECoCr-A. Microestrutura austenítica com carbonetos interdendríticos, com solidificação planar a partir do metal de base, seguida por grãos colunares.....	39
Figura 4.13 – Corpo de prova 2, imagens de micrografia (I) e (II) da zona fundida, região da linha de fusão próxima à superfície superior do metal de base, revestimento com Stellite ECoCr-A. Microestrutura semelhante ao corpo de prova 1, apresentando faixa menor de solidificação planar.....	40
Figura 4.14 – Corpo de prova 3, imagens de micrografia (I) e (II) da zona fundida, região da linha de fusão entre metal de base e primeira camada composta de E309-16. Microestrutura refinada, semelhante a martensita, na região inferior da imagem (II). Apresenta região não atacada.....	41
Figura 4.15 – Corpo de prova 4, imagens de micrografia (I) e (II), região da linha de fusão entre metal de base e E309-16. Microestrutura com pouca revelação, aparentando possuir martensita em alguns locais.....	42
Figura 4.16 – Corpo de prova 3, imagens de micrografia (I) e (II) da zona fundida, região da linha de fusão entre E309-16 (área clara inferior, não atacada) e Stellite RCoCr-A (área superior, atacada). Microestrutura austenítica com carbonetos interdendríticos.....	43

Figura 4.17 – Corpo de prova 4, imagens de micrografia (I) e (II) da zona fundida, região da linha de fusão entre E309-16 (área clara inferior, não atacada) e Stellite RCoCr-A (área superior, atacada).....	44
Figura 4.18 – Corpo de prova 5, imagens de micrografia (I) e (II) da zona fundida, região da linha de fusão próxima à superfície superior do metal de base, revestimento com Eutectrode 536. Microestrutura martensítica.....	45
Figura 4.19 – Corpo de prova 6, imagens de micrografia (I) e (II) da zona fundida, região da linha de fusão próxima à superfície superior do metal de base, revestimento com Eutectrode 536. Microestrutura martensítica.....	46
Figura 4.20 – Corpo de prova 1, ensaio de dureza Vickers no metal de base e zona fundida do cordão inicial, camada de ECoCr-A.....	48
Figura 4.21 – Corpo de prova 2, ensaio de dureza Vickers no metal de base e zona fundida do cordão final, camada de ECoCr-A.....	48
Figura 4.22 – Corpo de prova 3, ensaio de dureza Vickers no metal de base e zonas fundidas, com primeira camada de E309-16 e segunda camada de RCoCr-A. Cordões iniciais.....	49
Figura 4.23 – Corpo de prova 4, ensaio de dureza Vickers no metal de base e zonas fundidas, com primeira camada de E309-16 e segunda camada de RCoCr-A. Cordões finais.....	49
Figura 4.24 – Corpo de prova 5, ensaio de dureza Vickers no metal de base e zona fundida, com camada de Eutectrode 536. Cordão inicial.....	50
Figura 4.25 – Corpo de prova 6, ensaio de dureza Vickers no metal de base e zona fundida, com camada de Eutectrode 536. Cordão final.....	50
Figura 5.1 – Previsão da microestrutura da zona fundida, através do diagrama de Schaffler.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Aplicação Composições, segundo norma ASTM, do metal de base A283 Grau C.....	25
Tabela 4.2 – Composição química para consumíveis, conforme fabricantes.....	26
Tabela 4.3 – Parâmetros de soldagem para o processo de revestimento.....	27
Tabela 4.4 – Identificação dos corpos de prova e amostras de origem.....	28
Tabela 4.5 – Valores de composição química obtidos com o analisador de ligas portátil por raios X	51
Tabela 5.1 – Previsão da microestrutura da zona fundida, através do diagrama de Schaffler.....	54

SUMÁRIO

1 APRESENTAÇÃO	11
2 OBJETIVO	12
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 Desgaste dos materiais.....	14
3.1.1 <i>Abrasão</i>	14
3.1.2 <i>Adesão</i>	15
3.1.3 <i>Erosão</i>	16
3.1.4 <i>Fadiga Superficial</i>	18
3.1.5 <i>Corrosão</i>	19
3.1.5.1 <i>Danos por H₂S</i>	19
3.2 Revestimentos por Soldagem.....	21
3.2.1 <i>Weld Overlay</i>	22
4 PROCEDIMENTOS E ANÁLISES	24
4.1 Processo e Equipamento.....	24
4.2 Materiais.....	25
4.3 Procedimentos.....	26
4.4 Corte e Preparação de Corpos de Prova.....	27
4.5 Dados e Imagens.....	29
4.5.1 <i>Macrografias</i>	29
4.5.2 <i>Análise do Metal de Base</i>	30
4.5.3 <i>Análise das Zonas Fundidas</i>	38
4.5.4 <i>Ensaios de Durezas</i>	47
4.6 Composição Química.....	51
5 DISCUSSÕES E RESULTADOS	52
5.1 Propriedades Químicas.....	52
5.2 Microestruturas e Durezas.....	53
5.3 Descontinuidades.....	55
6 CONCLUSÃO	56

1 APRESENTAÇÃO

Nos diversos campos de aplicação dos materiais na engenharia, aqueles que exigem o melhor em propriedades físicas e durabilidade ao trabalho necessitam de soluções e inovações a uma frequência relativamente alta. As variações das premissas de projeto e aplicação ao longo da vida útil de diversos componentes, incluindo nisto a agressividade do ambiente, tempo de operação, pressão, temperatura, índice de reparos e viabilidade econômica, são fatores que estimulam a pesquisa e desenvolvimento destas novas soluções.

No campo petrolífero, novos desafios e novas solicitações surgem a todo momento, principalmente devido a adequação dos diversos sistemas que compõem o processo produtivo. Tais mudanças podem ocorrer para atender a demanda de derivados pelo mercado, modificações na legislação, modificação das características do hidrocarboneto explorado ou simplesmente pelo fato de se basear em uma atualização das práticas realizadas nas diversas plantas ao redor do mundo. Não raramente, tais desvios levam a situações não previstas em projeto, justificando o investimento em pesquisa e desenvolvimento.

Um dos focos existentes no campo petrolífero é a durabilidade dos materiais, associado à resistência mecânica e viabilidade econômica, principalmente dos metais. Os que atendem aos requisitos de resistência normalmente apresentam custo elevado, sendo assim necessário obter soluções como a utilização de dois ou mais materiais em conjunto, a fim de reduzir custos e ainda assim atingir a viabilidade técnica necessária. Assim, (GARCIA, 2011) a aplicação de revestimentos especiais de elevada resistência ao desgaste se constitui numa ação preventiva e que tem minimizado a degradação prematura de equipamentos.

Perante a uma necessidade específica, alguns revestimentos devem ser selecionados e estudados, sendo este o foco deste trabalho. Após a aplicação através de um processo de soldagem, estes revestimentos serão analisados e ensaiados, de modo a permitir uma visão inicial de sua viabilidade.

2 OBJETIVO

O estudo a ser realizado envolve uma conexão de aço para tubulações, que no caso trata-se de uma redução concêntrica. Os valores dimensionais não são relevantes à análise de resistência ao desgaste. Em campo, esta redução possui um escoamento interno composto por uma mistura de ar, H_2S em baixa concentração, água em baixa concentração e areia, sendo que a velocidade no trecho de menor diâmetro é elevada o suficiente para gerar um desgaste acentuado por abrasão e erosão, associados à corrosão. Conforme o diâmetro aumenta, a velocidade de escoamento diminui ao ponto de o desgaste ser praticamente nulo.

Nesta situação, o revestimento por *weld overlay* representa uma boa solução tendo em vista a aplicação de uma liga que apresente dureza, resiliência e tenacidade maiores do que o metal de base. Como existe a presença de H_2S e água, também deve-se levar em conta a resistência à corrosão por “ H_2S úmido”. Uma vez que a erosão e abrasão não representam ameaça ao material de base no segmento de maior diâmetro, o revestimento não irá englobar toda a superfície interna. A ação do H_2S no metal de base também não representa risco visto que o mecanismo de dano envolvido é o empolamento por hidrogênio, que, associado ao fato de estar em baixa concentração, é de fácil detecção e acompanhamento de sua evolução. A Figura 2.1 representa a idéia da aplicação do revestimento no equipamento.

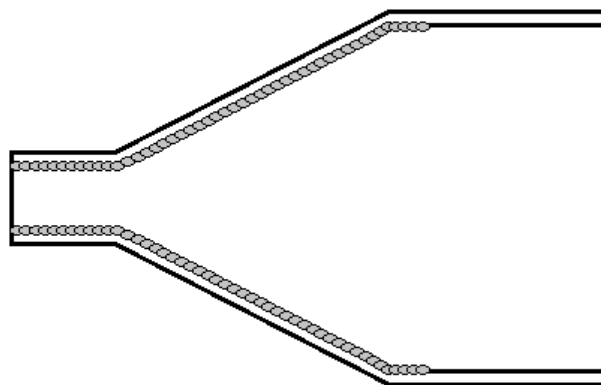


Figura 2.1 – Aplicação do revestimento no trecho inicial e redução.

Entretanto, o processo de revestimento, além de levar em conta os aspectos anteriores, também não deve gerar fragilizações à outros mecanismos de desgaste e falha. Os danos gerados por trincamento sob tensão por sulfetos (Sulfide Stress Cracking – SSC) não necessitam de altas taxas de H₂S e água presentes, sendo apenas necessária a existência de durezas elevadas no material de base para ocorrerem. Desta forma, além do controle dos parâmetros de soldagem voltados à qualidade do revestimento, existe a preocupação de não modificar a estrutura do metal de base e por consequencia fragilizá-lo.

Assim, o estudo neste trabalho tem por fim testar diferentes materiais e procedimentos de soldagem na aplicação de revestimentos por *weld overlay* e, analisando suas características, extrapolá-las em capacidades de resistir aos mecanismos de desgaste presentes.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Desgaste dos Materiais

Diferentes mecanismos de deterioração podem agir sobre os materiais levando-os à falha ou mal funcionamento de componentes mecânicos. O conhecimento dos mesmos é de extrema importância para se tomar decisões de viabilidade técnica e econômica nas aplicações desejadas, como, por exemplo, o tipo e quantidade de revestimento, processo utilizado, parâmetros de soldagem e outros.

Dentre os tipos de desgaste dos materiais, em especial os metais, podemos citar alguns exemplos que mais chamam a atenção no campo da engenharia e que costumemente representam os maiores níveis de reparo em equipamentos mecânicos. São eles a abrasão, adesão, erosão, fadiga superficial e corrosão.

3.1.1 *Abrasão*

O sistema de desgaste por abrasão se caracteriza pela remoção de material de uma determinada superfície através do movimento de partículas duras (dureza superior em relação à da superfície) ou com geometria aguda sobre a mesma. Estas partículas, dependendo da tensão de contato com o material, geram desgaste da superfície através de deformação plástica induzida por cortes e cisalhamentos (INFOSOLDA¹).

Podemos realizar uma analogia à múltiplos sistemas de usinagem, onde o material é retirado gerando canais com perfil de borda sobressalente e encruada, facilitando a remoção por outros sistemas de desgaste. A Figura 3.1 exemplifica o sistema abrasivo.

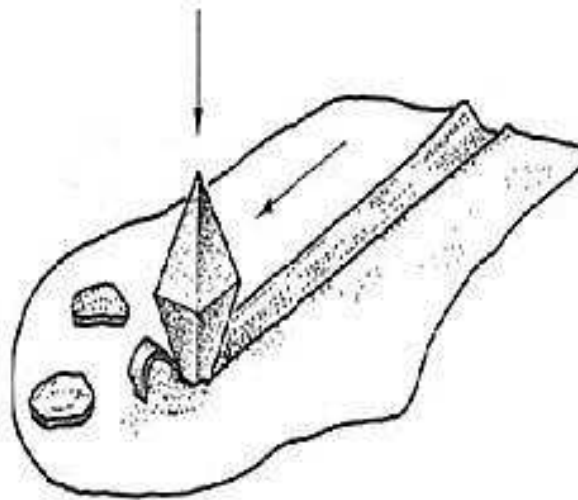


Figura 3.1 – Mecanismo de desgaste por abrasão.

O desgaste por abrasão, por suas características, pode ser dividido em duas categorias: abrasão em alta tensão e baixa tensão. A de baixa tensão é indicada por uma superfície ranhurada, de canais longos, onde o elemento abrasivo não sofre compressão suficiente para sua trituração. Já a de alta tensão apresenta uma superfície com crateras (“pits”) e elementos abrasivos presos no material, indicando uma forte deformação plástica e conseqüente severidade em relação ao sistema de abrasão em baixa tensão.

Um dos métodos para se contornar o desgaste por abrasão é aumentar a dureza da superfície, obtendo um valor acima da dureza dos elementos abrasivos do meio. Materiais com microconstituintes duros também apresentam uma menor taxa de desgaste por abrasão, assim como sistemas projetados para reduzir o movimento relativo entre superfícies.

3.1.2 Adesão

O desgaste por adesão ocorre na existência de movimento relativo entre duas superfícies que estão em contato. Normalmente este tipo de desgaste ocorre em

sistemas onde tal movimento não é previsto, como, por exemplo, juntas ou acoplamentos sujeitos a vibração mecânica.

O contato das superfícies, cada uma com seu perfil de rugosidade, gera pequenos e concentrados pontos de alta tensão, ocasionando deformação plástica e arrancamento de material. Este material suspenso, devido ao movimento relativo das superfícies, inicia também um processo abrasivo no sistema. Se estas partículas se oxidam, o sistema torna-se mais severo (INFOSOLDA¹).

Dependendo da tensão aplicada entre as superfícies, alguns pontos de soldagem por contato podem ocorrer. Quando o movimento relativo ocorre, tal ponto é levado à ruptura e, conseqüentemente, transferência de material, assim como alteração no perfil de rugosidade. Exemplos deste padrão de desgaste ocorrem em sistemas que apresentam emperramento por problemas de projeto ou dilatação térmica, com folgas mal dimensionadas.

Modos de evitar este tipo de desgaste concentram-se em evitar o movimento relativo entre superfícies ou diminuir a severidade do sistema, seja pela utilização de lubrificantes ou reduzir as cargas nos elementos.

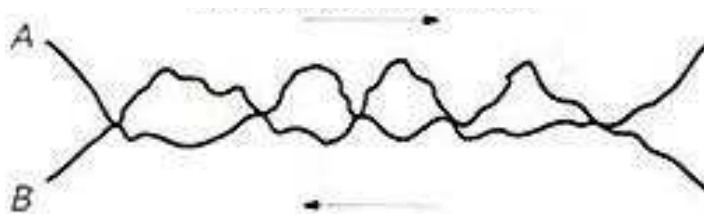


Figura 3.2 – Sistema de desgaste por adesão.

3.1.3 Erosão

O desgaste por erosão se caracteriza pela remoção de material por deformação plástica e fratura. Impactos contínuos sob uma superfície levam a mesma a desenvolver fadiga superficial e conseqüente falha na região, ocorrendo remoção de material.

Dependendo da energia associada ao impacto, assim como ângulo de ataque, a remoção de material pode ocorrer rapidamente sem o desenvolvimento de fadiga, caracterizando um sistema misto de abrasão e erosão.

A erosão pode ocorrer através de partículas sólidas, líquidas e por meio de cavitação (INFOSOLDA¹). Nos dois primeiros casos, o impacto direto das partículas é que gera a deterioração da superfície, dependendo de velocidade, ângulo de ataque, massa, geometria e tamanho de partícula. Já no segundo caso (WILL, C. R. 2008) quando localmente a pressão parcial dos vapores ou gases dissolvidos no líquido cai a valores iguais ou inferiores à pressão de vaporização àquela temperatura, bolhas preenchidas

por gases ou vapores ou por ambos, irão se formar. A implosão destas bolhas geram ondas mecânicas, que levam ao desgaste da superfície.

As soluções para este mecanismo de desgaste devem levar em consideração as características das fonte de impacto. No caso de cavitação e partículas líquidas, superfícies duras devem ser evitadas devido à dissipação de energia ocorrer sempre no material agredido, levando-o ao desgaste. Uma superfície com tenacidade e resiliência altas apresentará uma grande resistência se comparada a uma superfície de dureza elevada.

Entretanto, em uma situação onde existe a incidência de partículas sólidas, uma dureza adicional pode ser benéfica até certo ponto. Uma vez que a partícula incidente pode se fragmentar, parte da energia gerada no impacto é removida pela própria partícula. Assim, a dureza é benéfica até o ponto de não comprometer a resistência à fadiga, que também ocorre devido a este mecanismo de desgaste. Como citado anteriormente, os fragmentos removidos podem gerar abrasão, que também acaba sendo reduzido devido à dureza do material.

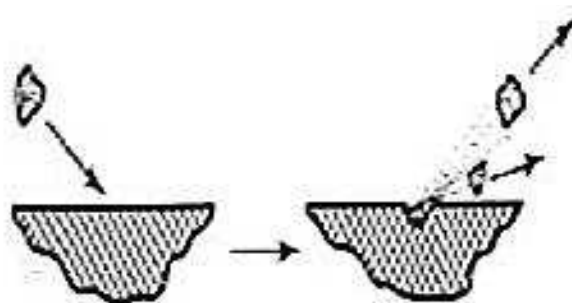


Figura 3.3 – Sistema de desgaste por erosão.

3.1.4 Fadiga Superficial

O desgaste por fadiga superficial, apesar de se caracterizar por uma perda de material devido a impactos e consequente fadiga, difere-se da erosão por apresentar sinais e degradação a nível macro se comparados com os demais tipos de mecanismos de desgaste. Normalmente ocorre em pistas de rolamento, furadeiras pneumáticas, engrenagens, cames, etc, ou seja, contato entre superfícies de grande porte. A física deste processo apresenta algumas variações devido a carga e ciclagem dos contatos, entretanto a falha sempre se dará por fadiga.

Entre as características deste tipo de desgaste estão a formação de pitting acentuado e trincas que levam à remoção de material. Também é possível observar situações onde a superfície fratura na forma de escamas, normalmente em peças que apresentam revestimento.

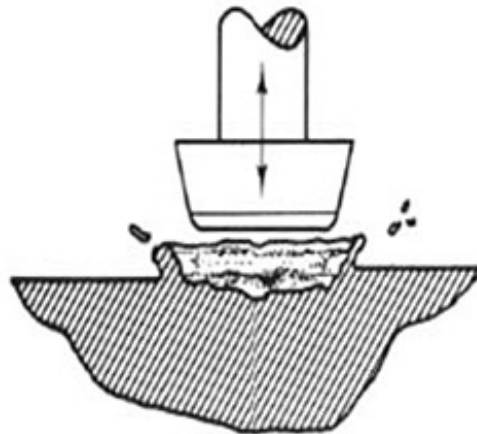


Figura 3.4 – Sistema de desgaste por fadiga.

3.1.5 Corrosão

A corrosão situa-se como um dos mecanismos mais presentes em casos de desgaste. Caracteriza-se pela remoção de material ou degradação das propriedades mecânicas do mesmo através de reações químicas ou eletroquímicas. As características do meio, assim como as solicitações mecânicas que o material está exposto, influenciam diretamente nas taxas de corrosão sofridas.

A física envolvida no processo de corrosão normalmente consiste na reação do material com elementos químicos disponíveis nas vizinhanças, levando à formação de compostos estáveis. Estes compostos, ao serem removidos, expõem o material de base novamente ao meio, iniciando novas reações e gerando um ciclo de desgaste. Diversas equações de reação podem ser obtidas dependendo das características do meio e dos materiais envolvidos, sendo de grande importância seu conhecimento e entendimento a fim de se obter uma solução.

A escolha do material em função do meio e de suas características é um ponto de partida na eliminação ou minimização da corrosão. Alguns materiais simplesmente não irão reagir, seja por não haver afinidade química, seja por haver barreiras passivas contidas na superfície. Quando esta possibilidade não é viável, alternativas como o revestimento da superfície, indução de corrente ou utilização de metais de sacrifício podem ser adotadas. Cabe à engenharia avaliar qual será o melhor custo-benefício de cada aplicação.

3.1.5.1 Danos por H_2S

Na indústria petrolífera a utilização de materiais deve levar em conta os diversos meios corrosivos existentes na cadeia de produção. Um dos elementos corrosivos presentes é o H_2S , onde sua reação com os aços forma o sulfeto de ferro (FeS) e libera íons de hidrogênio, que podem se recombinar e formar gás hidrogênio. Encontrando-se solubilizado em água, o (agora) ácido sulfídrico, ou H_2S -úmido,

proporciona além da corrosão, a fragilização e o trincamento do aço, o que se dá através de sua hidrogenação (ALVISI, 2010).

Em termos gerais, quanto maior a concentração de H_2S em um meio aquoso, maior a disponibilidade de hidrogênio atômico. Este hidrogênio possui grande facilidade de se locomover através do aço, e com isso pode gerar diversos problemas metalúrgicos. Os danos devido à H_2S úmido, segundo a API 571, podem ser divididos em: empolamento por hidrogênio (Hydrogen Blistering – HB), trinca induzida por hidrogênio (Hydrogen Induced Cracking – HIC), trinca induzida por hidrogênio orientada por tensão (Stress Oriented Hydrogen Induced Cracking – SOHIC) e trinca sob tensão por sulfetos (Sulfide Stress Cracking – SSC).

O HB é caracterizado por bolhas e expansão da superfície do aço. Pode ocorrer nas superfícies internas, externas ou no meio da espessura do material e é devido ao acúmulo de hidrogênio atômico em descontinuidades internas, como inclusões ou laminações. A combinação deste hidrogênio atômico em sua forma de gás acaba por enclausurá-lo na descontinuidade, e progressivamente seu volume e pressão aumentam gerando tensões e deformações ao seu redor.

A HIC pode ser considerada uma consequência do HB onde diversos empolamentos ocorrem em profundidades próximas. As tensões geradas entre os núcleos de empolamento acabam por levar o material que se encontra entre os mesmos à falha, unindo estes núcleos e formando uma descontinuidade em forma de escada, normalmente de forma paralela à espessura do material.

A SOHIC ocorre de forma semelhante à HIC, entretanto esta trinca é orientada por tensões no material, sendo perpendicular às mesmas. Neste caso, os diversos núcleos de empolamento são unidos, normalmente, no sentido transversal à espessura do material, representando um grande risco de falha do equipamento em operação.

Danos por SSC são gerados por uma combinação de fatores, que envolvem tensões, microestruturas frágeis, baixa ductilidade e o processo de corrosão por H_2S úmido. O hidrogênio absorvido, ao se recombinar em camadas subsuperficiais, gera tensões que não são suportadas pelas vizinhanças e acaba nucleando trincas abertas à superfície exposta ao H_2S . A trinca, por possuir um concentrador de tensões, inicia seu crescimento com o contínuo ataque por sulfetos e hidrogênio, levando a um risco

elevado de falha total da secção. A proporção de microestruturas frágeis, tensões ativas ou residuais e baixa ductilidade agravam o crescimento da trinca. Segundo a norma de práticas NACE SP0296-2010, um aço é considerado resistente à SSC caso sua dureza esteja limitada à aproximadamente, 200 HV. Entretanto, em regiões próximas à soldas, durezas superiores podem aparecer, e ainda assim são consideradas resistentes caso a dureza não ultrapasse 248 HV. Ainda, segundo a mesma norma, pequenas concentrações de H₂S em água (na ordem de 50 ppm de sulfeto) já são suficientes para gerar danos por SSC.

3.2 Revestimentos por Soldagem

O comprometimento de peças e equipamentos pelos fenômenos de desgaste/ e ou corrosão proporcionam consideráveis perdas econômicas, seja em função da parada para manutenção em um tempo relativamente curto, ou de danos ocorridos na linha de produção (GARCIA, 2011). Uma vez indentificados e entendidos os mecanismos de desgaste, pode-se tomar decisões que envolvem desde a retirada ou minimização dos elementos envolvidos no desgaste ou aplicar as proteções necessárias no material. No segundo caso, passa-se então a realizar a escolha do método e tipos a serem utilizados.

O revestimento de materiais metálicos aparece como uma alternativa viável economicamente, pois os processos e ambientes de aplicação destes materiais muitas vezes não permitem um controle eficiente dos agentes de desgaste. Como regra, os processos de soldagem são preferidos para revestimento quando se requer espessura relativamente grossa do revestimento com alta tensão de aderência entre revestimento e peça. Os processos de metalização, por outro lado, são preferidos para revestimentos de espessura fina e aplicação de camadas duras com deformação mínima da peça (INFOSOLDA²).

Os revestimentos por soldagem se enquadram nos processos mecânicos de proteção de superfícies, onde podemos citar a deposição direta por soldagem (*weld overlay*) e o revestimento com chapas soldadas (*lining*). Ambos os métodos buscam

como objetivo a proteção através do isolamento do material, evitando seu contato com o meio degradante. Os materiais escolhidos para a proteção devem ser resistentes aos processos de desgaste assim como também compatíveis no quesito de soldabilidade, uma vez que falhas ou fragilizações não devem ser inseridas.

3.2.1 *Weld Overlay*

Na deposição de metais sobre uma superfície metálica através de *weld overlay* é necessário atentar-se às diversas características da soldagem envolvidas, como o tipo de processo utilizado, metal de adição escolhido, máxima diluição permitida, fases desenvolvidas, resistências mecânica e química obtidas, nível de descontinuidades geradas e outras. A geometria da peça envolvida e suas limitações dimensionais também devem ser levadas em consideração no momento da escolha do processo e consumíveis.

Das características citadas, a escolha do processo (e conseqüentemente o tipo de consumível – vareta, eletrodo, fita, pó, etc) representa grande influência no resultado final a ser obtido. Peças pequenas e de geometria bem definida usualmente não devem sofrer alto aporte térmico ou processos que resultem em alta diluição. Nestes casos, processos semi ou totalmente automatizados podem ser requeridos a fim de se obter uma qualidade mínima de revestimento, sem gerar falta de fusões ou deformações térmicas. Já peças e equipamento de grande porte possuem maior versatilidade na escolha do processo, podendo este ser totalmente manual.

No caso da escolha do metal de adição, deve-se levar em conta o ambiente e mecanismo de desgaste envolvido, assim como o nível de diluição (INFOSOLDA³). Algumas ligas, apesar de apresentarem características aceitáveis em sua forma pura, podem perder grande parte de suas propriedades devido às diluições elevadas, implicando em vida reduzida em operação ou simplesmente a incapacidade de resistir aos elementos de desgaste no meio. As tensões e deformações geradas pela soldagem também devem ser levadas em conta, sendo que o revestimento escolhido (aliado ao processo e procedimento) deve possuir boa ductilidade a fim de minimizar ou eliminar tais efeitos,

assim como outros problemas possíveis de surgirem como a fadiga térmica e consequente destacamento do revestimento ou falha do metal de base. Também deve-se levar em conta que, segundo SILVA *et al.*, 2012, a deposição destes revestimentos constitui um procedimento complexo do ponto de vista metalúrgico, no qual ocorre a fusão e a solidificação de um volume de metal composto por duas diferentes ligas em termos de composição química, estrutura cristalina, microestrutura e propriedades físicas e mecânicas. No caso de aplicações de revestimentos de aços inoxidáveis, os diagramas de Schaeffler e DeLong apresentam previsões de microestruturas obtidas em função do cromo e níquel equivalentes, que por sua vez podem ser estimadas em função da diluição prevista ou obtida.

Atrelado às considerações de processo e tipo de metal de adição, os parâmetros de soldagem possuem grande influência na obtenção de um revestimento com as características desejadas. Através deles é possível controlar a diluição de diversas formas, como a regulagem do stick-out, corrente e velocidade de avanço, também afetando tensões térmicas e microestrutura obtida. O número de passes, espessura do cordão e efeitos de passes de revenimento também afetam a dureza, microestrutura e nível de tensões. O controle dos diversos parâmetros de soldagem ainda possibilita contornar possíveis problemas, como trincas e falta de fusão, assim como melhorar o desempenho do revestimento sob o mecanismo de desgaste a ser combatido. Todos estes parâmetros, associados à limpeza da superfície, proteção do arco e demais configurações do processo (oscilação do eletrodo, inclinação, posição de soldagem, habilidade do soldador, etc), possibilitam diferentes resultados em relação ao revestimento soldado.

4 PROCEDIMENTOS E ANÁLISES

O estudo foi realizado utilizando três amostras de metal de base com aplicação de revestimentos diferentes em cada amostra, procurando-se manter os parâmetros de soldagem em níveis e valores constantes. As variações que ocorreram são em consequência das adequações dos diferentes materiais de adição e processos envolvidos, visando a melhor soldabilidade possível.

Em todas as etapas e definições realizadas para o estudo, a flexibilidade e simplicidade do procedimento foram sempre tomadas como prioridade. Alguns procedimentos, como pós-aquecimento, por exemplo, não foram executados justamente para verificação e análise da real necessidade, assim como riscos envolvidos e custo-benefício.

4.1 Processo e Equipamento

Os processos escolhidos para a realização dos revestimentos por *weld overlay* foram a soldagem com eletrodos revestidos e TIG com argônio. Tal definição levou em conta a necessidade da aplicação, onde a peça (redução em aço) será soldada em campo, de forma manual, por soldadores qualificados, com uma fonte comercial simples, tanto na aplicação do revestimento como em suas futuras manutenções.

A escolha da fonte deve levar em conta os metais de adição utilizados (varetas e eletrodos revestidos), faixas de tensão e corrente e o fator de serviço do equipamento. Neste estudo, a amplitude de corrente situa-se entre 60 e 250 amperes (com base nos valores de soldagem apresentados pelos fabricantes – os materiais utilizados serão descritos a diante) e o fator de serviço em 80% (levando em conta a troca de eletrodos consumidos por novos e limpeza dos cordões entre cada passe).

4.2 Materiais

O metal de base utilizado nos ensaios foi o aço ASTM A283 – Gr. C, sendo este o mesmo utilizado na construção da redução. As amostras, entretanto, não foram soldadas em chapas calandradas, sendo que a acessibilidade, ângulo de ataque do eletrodo e posição de soldagem podem variar para a aplicação real. As características do metal de base são apresentadas a seguir.

Tabela 4.1 – Aplicação Composições, segundo norma ASTM, do metal de base A283 Grau C.

ASTM A283 Gr. C	C máx (%):	Mn máx (%):	P máx (%):	S máx (%):	Si máx (%):
	0,24	0,90	0,35	0,40	0,40

Com base na finalidade da aplicação de revestimentos neste estudo, que é a proteção do metal de base contra processos de desgaste por abrasão e erosão, as seguintes amostras de metais de adição foram geradas:

- Revestimento “A”, composto de uma camada de solda, com eletrodos Stellite SFA-5.13 ECoCr-A, diâmetro de 3,25 mm;

- Revestimento “B”, composto de duas camadas de solda, sendo a primeira com eletrodos SFA-5.4 E309-16, diâmetro de 3,25 mm, e a segunda com varetas Stellite SFA-5.13 RCoCr-A, diâmetro de 3,2 mm;

- Revestimento “C”, composto de uma camada de solda, com eletrodos de marca comercial Eutectrode 536, diâmetro de 3,2mm;

Em teoria, todos os revestimentos escolhidos apresentam boa resistência aos mecanismos de desgaste envolvidos, assim como apresentam quantidades mínimas de cromo para resistir aos ataques químicos (oxidação e H₂S).

As propriedades químicas dos materiais utilizados, assim como durezas previstas, são apresentadas a seguir (KESTRA e ESAB, catálogos técnicos, 2013). O consumível Eutectrode 536, cujas composições químicas não são informadas pelo fabricante, é apresentado pelo mesmo como um aço inoxidável martensítico, recomendado por apresentar resistência à corrosão, erosão e abrasão (CASTOLIN EUTETIC, catálogo técnico, 2013), assim como dureza prevista de 55 HRc (~600 HV).

Tabela 4.2 – Composição química para consumíveis, conforme fabricantes.

Metal de Solda	%C	%Cr	%Co	%W	%Ni	%Si	%Mo	%Mn
ECoCr-A (austenítico)	1,1	28,0	65,0	5,0	-	-	-	-
RCoCr-A (austenítico)	1,1	28,0	65,0	5,0	-	-	-	-
E309-16 (austenítico/ferrítico)	0,10	24,0	-	-	14,0	0,40	0,30	1,30

4.3 Procedimentos

Todas as amostras de revestimento foram realizadas seguindo os procedimentos de soldagem pré definidos. As chapas de aço utilizadas como metal de base também possuem dimensões padrão. Ambas as informações são apresentadas a seguir.

Tabela 4.3 – Parâmetros de soldagem para o processo de revestimento.

	Amostra "A"	Amostra "B"	Amostra "C"
Metal de base [MB]	A-283 Gr. C	A-283 Gr. C	A-283 Gr. C
Metal de Adição	ECoCr-A	RCoCr-A E309-16	Eutectrode 536
Posição de Soldagem	Plana	Plana	Plana
Pré-Aquecimento	Não	Não	Não
Temp. Interpasse	150 °C	250 °C	Não
Pós-Aquecimento	Não	Não	Não
Tensão [V]	14	RCoCr-A: 16 E309-16: 31	
Corrente [A]	85	RCoCr-A: 175 E309-16: 120	120
Polaridade	CC-	RCoCr-A: CC- E309-16: CC+	CC+
Dimensões [MB]	155x155x12,7 mm	155x155x12,7 mm	155x155x12,7 mm

4.4 Corte e Preparação de Corpos de Prova

Todas as amostras foram soldadas na mesma configuração (ângulo e posição), com cordões sequenciais, paralelos e com sobreposição, de modo a preencher uma superfície suficiente para gerar dois corpos de prova através de corte mecânico. Cada corpo de prova possui um trecho do o início e fim do processo de revestimento, sendo realizadas análises por macrografia, micrografia e microdureza em em determinadas áreas de cada uma. Todos os corpos de prova passaram por lixamento até granulometria 600, polimento com alumina e ataque químico específico para cada material em estudo. Uma representação da sequência e identificação das amostras é apresentada a seguir.

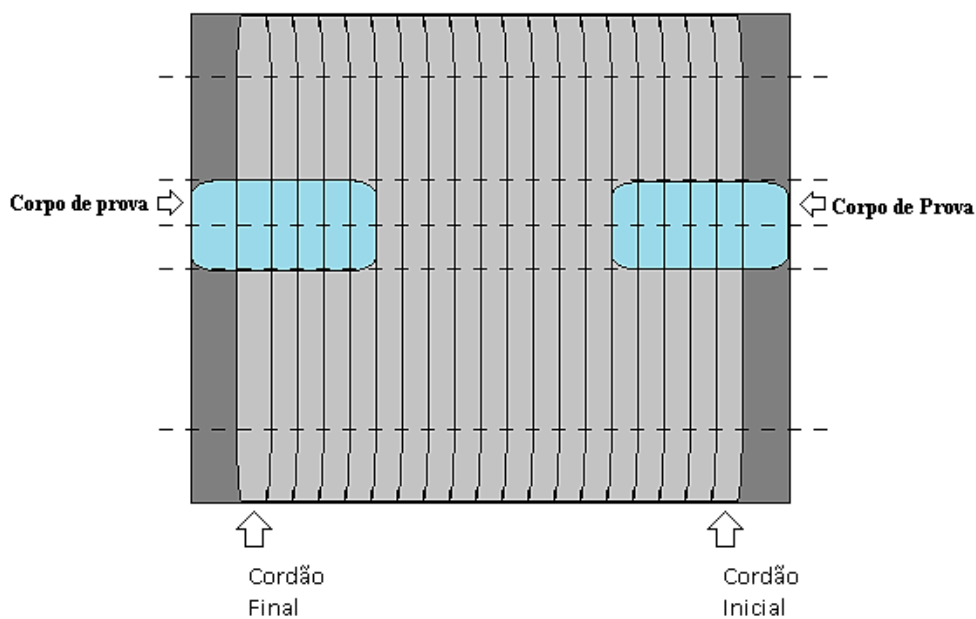


Figura 4.1 – Localização dos corpos de prova, indicando primeiro e último cordão do processo realizado. Os cortes mecânicos foram realizados ao longo das linhas pontilhadas.

Tabela 4.4 – Identificação dos corpos de prova e amostras de origem.

Identificação Corpo de Prova	Metal de Adição	Identificação da Amostra
1	ECoCr-A (cordão inicial)	Amostra A
2	ECoCr-A (cordão final)	Amostra A
3	RCoCr-A + E309-16 (cordão inicial)	Amostra B
4	RCoCr-A + E309-16 (cordão final)	Amostra B
5	Eutectrode 536 (cordão inicial)	Amostra C
6	Eutectrode 536 (cordão final)	Amostra C

4.5 Dados e Imagens

4.5.1 Macrografias

As imagens de macrografia, com os corpos de prova atacados no metal de base, são apresentadas a seguir.



Figura 4.2 – Macrografias dos corpos de prova 1 (esquerda) e 2 (direita), gerados a partir da amostra “A”, com revestimento de uma camada em ECoCr-A.



Figura 4.3 – Macrografias do corpos de prova 3 (esquerda) e 4 (direita), gerados a partir da amostra “B”, com revestimento composto de primeira camada em de uma camada em E309-16 e segunda camada em RCoCr-A.



Figura 4.4 – Macrografias do corpos de prova 5 (esquerda) e 6 (direita), gerados a partir da amostra “C”, com revestimento composto de uma camada em Eutectrode 536.

4.5.2 Análise do Metal de Base

As imagens e dados gerados através das análises abrangem áreas críticas do processo de soldagem em relação ao metal de base. Neste caso, foi considerado que as regiões de fronteira com as linhas de fusão, principalmente as inferiores, são as mais propensas a gerar durezas elevadas ou outros tipos de problemas, como falta de fusão. Esta premissa é embasada no comportamento teórico do fluxo de calor em uma chapa, onde o aumento da espessura da mesma leva a uma maior transferência de calor, e conseqüentemente um menor tempo na faixa ΔT_{8-5} . No caso em questão, devido à espessura da chapa utilizada (12,7 mm), o escoamento de calor já apresenta comportamento tridimensional, caracterizado por uma contribuição elevada da espessura do material.

Outra consideração utilizada no estudo vem da norma de praticas NACE SP0296-2010. A mesma argumenta que, pelo fato de existir a influência da zona termicamente afetada (ZTA) de um determinado cordão soldado sobre o passe anterior a este (zona fundida e ZTA), gerando assim um efeito de revenimento, o último cordão realizado em um processo seria o de maior probabilidade de apresentar durezas elevadas, uma vez que o mesmo não seria exposto a nenhum gradiente térmico da mesma forma que os passes anteriores. Assim, o último cordão de solda torna-se objeto de estudo neste trabalho.

Seguindo esta linha de pensamento, uma terceira consideração pôde ser levantada. Apesar de o último cordão soldado não sofrer influência de posteriores tratamentos térmicos, a temperatura do metal de base no momento da soldagem era elevada devido aos diversos passes anteriores, representando um efeito de pré-aquecimento. Visto isso, todos os passes de solda sofreram este efeito, com excessão do primeiro. Desta forma, o primeiro cordão do processo de revestimento também é foco de estudo.

Com base nas considerações realizadas, tem-se que as regiões de interesse são as áreas adjacentes às linhas de fusão, no metal de base, restringindo o estudo ao primeiro e último cordão. Imagens foram realizadas em três zonas ao longo da linha de fusão, sendo uma próxima à superfície superior do metal de base, uma na extremidade inferior da linha de fusão e uma próxima à linha de fusão do cordão adjacente. O ataque químico foi realizado utilizando Nital a 1,0%. As imagens são apresentadas a seguir, assim como desenho representativo das áreas de interesse.

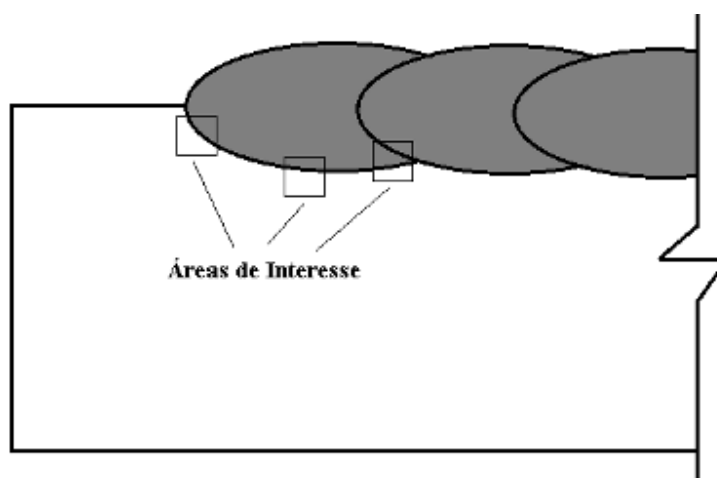


Figura 4.5 – Áreas de interesse dos corpos de prova para análise do metal de base, para cordões iniciais e finais.

O comportamento da microestrutura do metal de base dos corpos de prova 1, 3 e 5 segue o mesmo padrão, assim como o comportamento dos corpos de prova 2, 4 e 6. Apenas dois exêmplos são apresentados – corpos de prova 1 e 2.

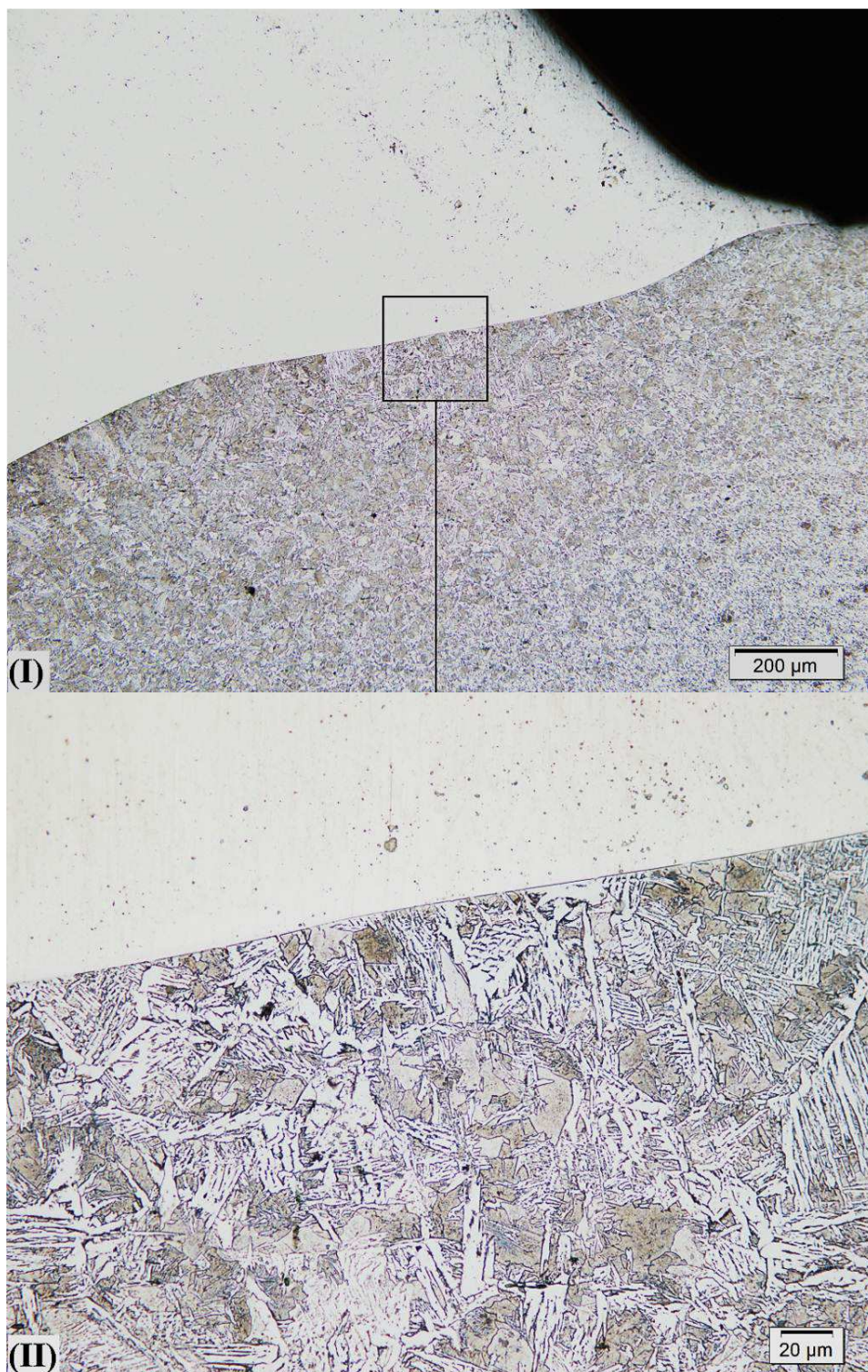


Figura 4.6 – Corpo de prova 1, imagens de micrografia (I) e (II) da linha de fusão com metal de base, região próxima da superfície superior do metal de base. Microestrutura evidenciada na imagem (II) apresenta grãos grosseiros, composta por perlita, ferrita e ferrita alinhada.

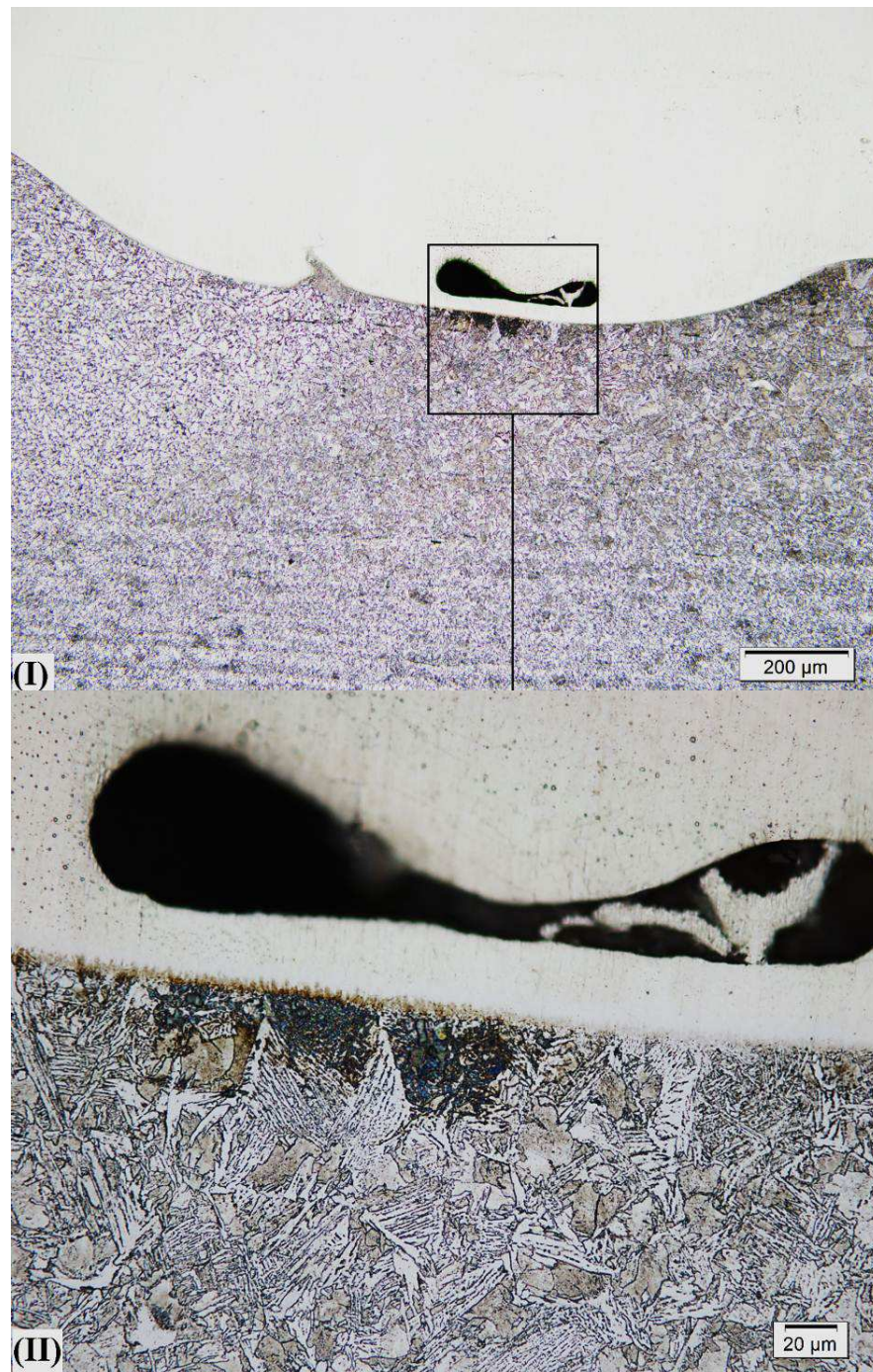


Figura 4.7 – Corpo de prova 1, imagens de micrografia (I) e (II) da linha de fusão com metal de base, região da extremidade inferior do cordão. Região de refino de grão visível na imagem (I), à esquerda, por influência da ZTA do cordão subsequente. Microestrutura de grãos grosseiros evidenciada na imagem (II), próxima a um poro localizado na zona fundida, apresentando grande quantidade de ferrita alinhada. Manchas de oxidação são visualizadas, devido à umidade contida no poro.

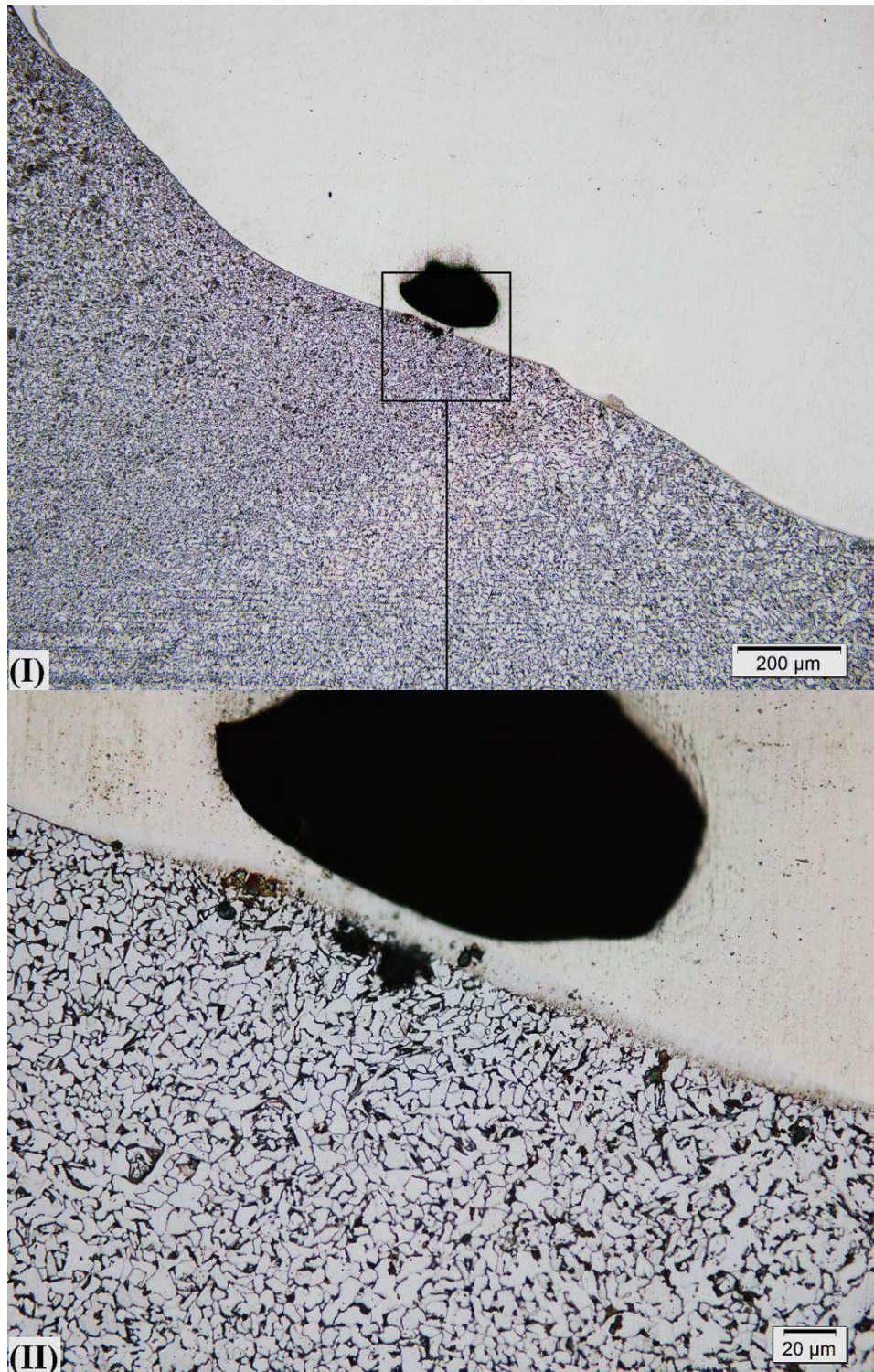


Figura 4.8 – Corpo de prova 1, imagens de micrografia (I) e (II) da linha de fusão com metal de base, região próxima da linha de fusão do segundo cordão. Região de refino de grão visível na imagem (I) e (II), por influência da ZTA do cordão subsequente. Também é visualizado manchas de oxidação próximas a um poro.

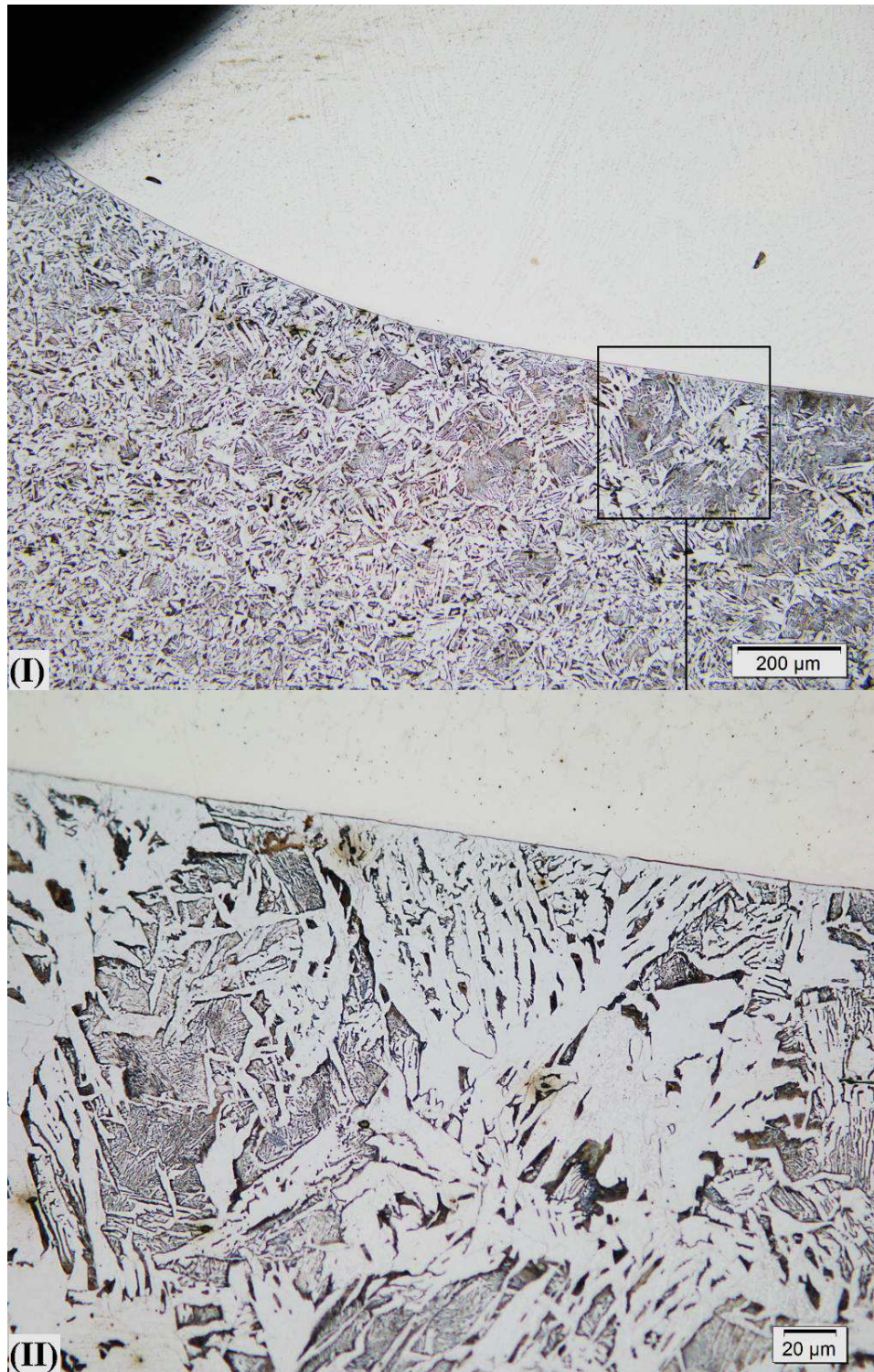


Figura 4.9 – Corpo de prova 2, imagens de micrografia (I) e (II) da linha de fusão com metal de base, região próxima da superfície superior do metal de base. Microestrutura evidenciada na imagem (II) apresenta grãos grosseiros, composta por perlita, ferrita e ferrita alinhada, também visualizada nas demais regiões do metal de base ao longo da linha de fusão.

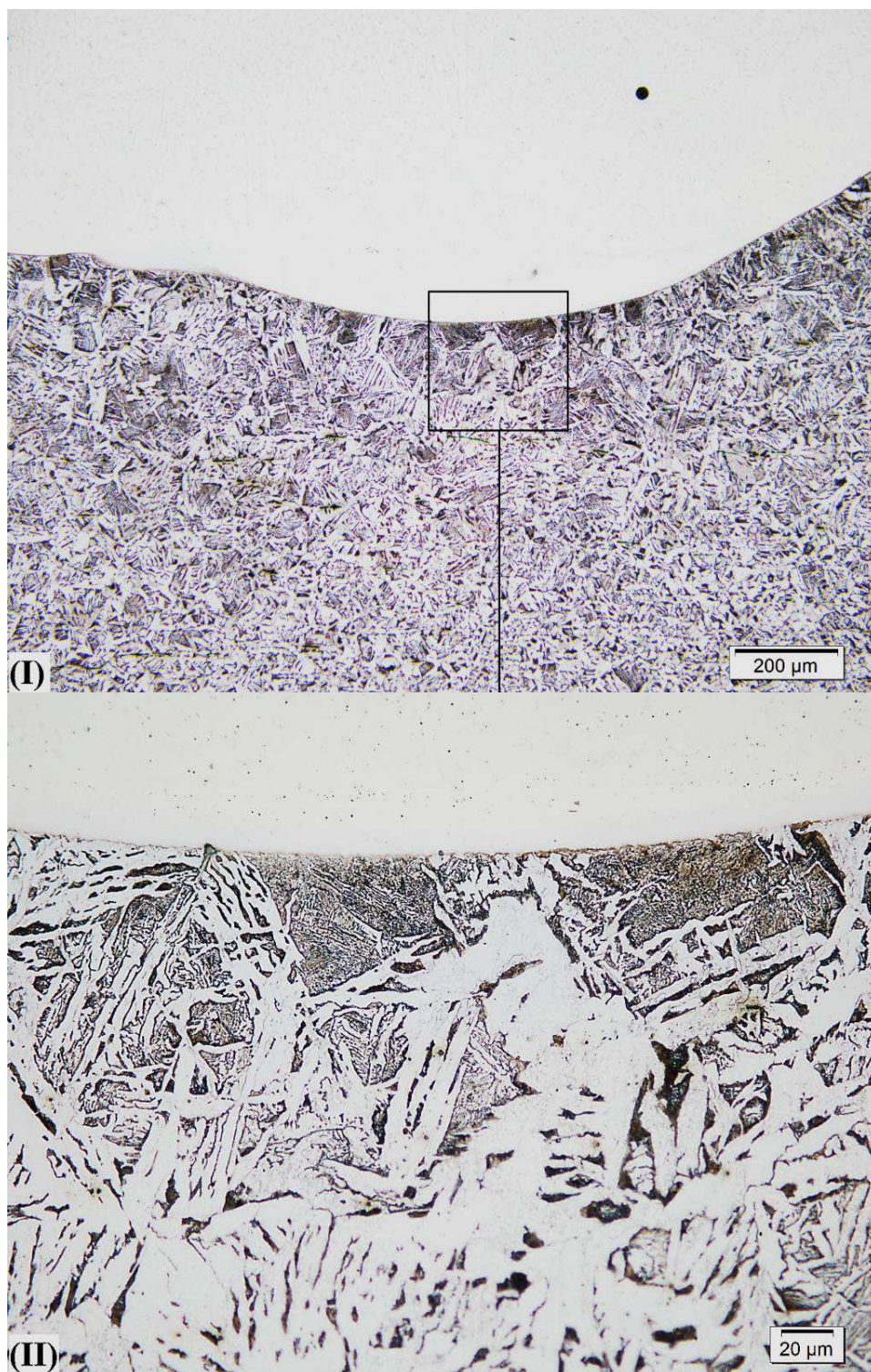


Figura 4.10 – Corpo de prova 2, imagens de micrografia (I) e (II) da linha de fusão com metal de base, região da extremidade inferior do cordão. Microestrutura de grãos grosseiros em toda a extensão da imagem (I).

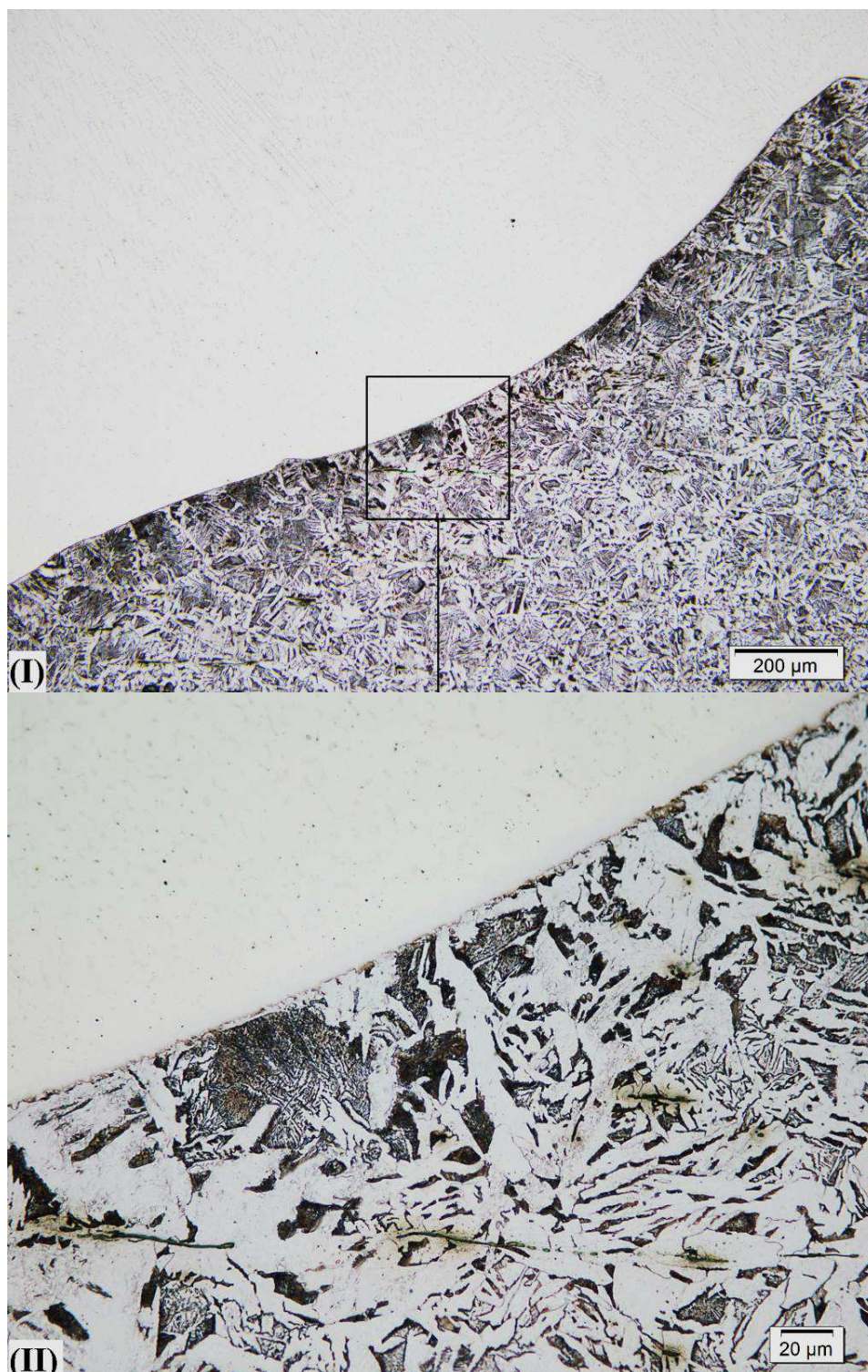


Figura 4.11 – Corpo de prova 2, imagens de micrografia (I) e (II) da linha de fusão com metal de base, região próxima do penúltimo cordão. Microestrutura de grãos grosseiros em toda a extensão das imagens. Não existe região de refino de grão, justificado por não haver ciclo térmico devido a ausência de cordões posteriores.

4.5.3 Análise das Zonas Fundidas

As zonas fundidas no processo também são foco de análise, uma vez que o desempenho do equipamento (redução em aço) está diretamente atrelado à capacidade dos revestimentos utilizados em resistir aos mecanismos de desgaste presentes. Para visualização da microestrutura das ligas de cobalto, os corpos de prova sofreram ataque eletrolítico com ácido oxálico, e para as ligas de aço inoxidável (309-16 e Eutectode), os ataques foram realizados com Marble (sulfato de cobre e ácido clorídrico), por imersão. As imagens são apresentadas a seguir.

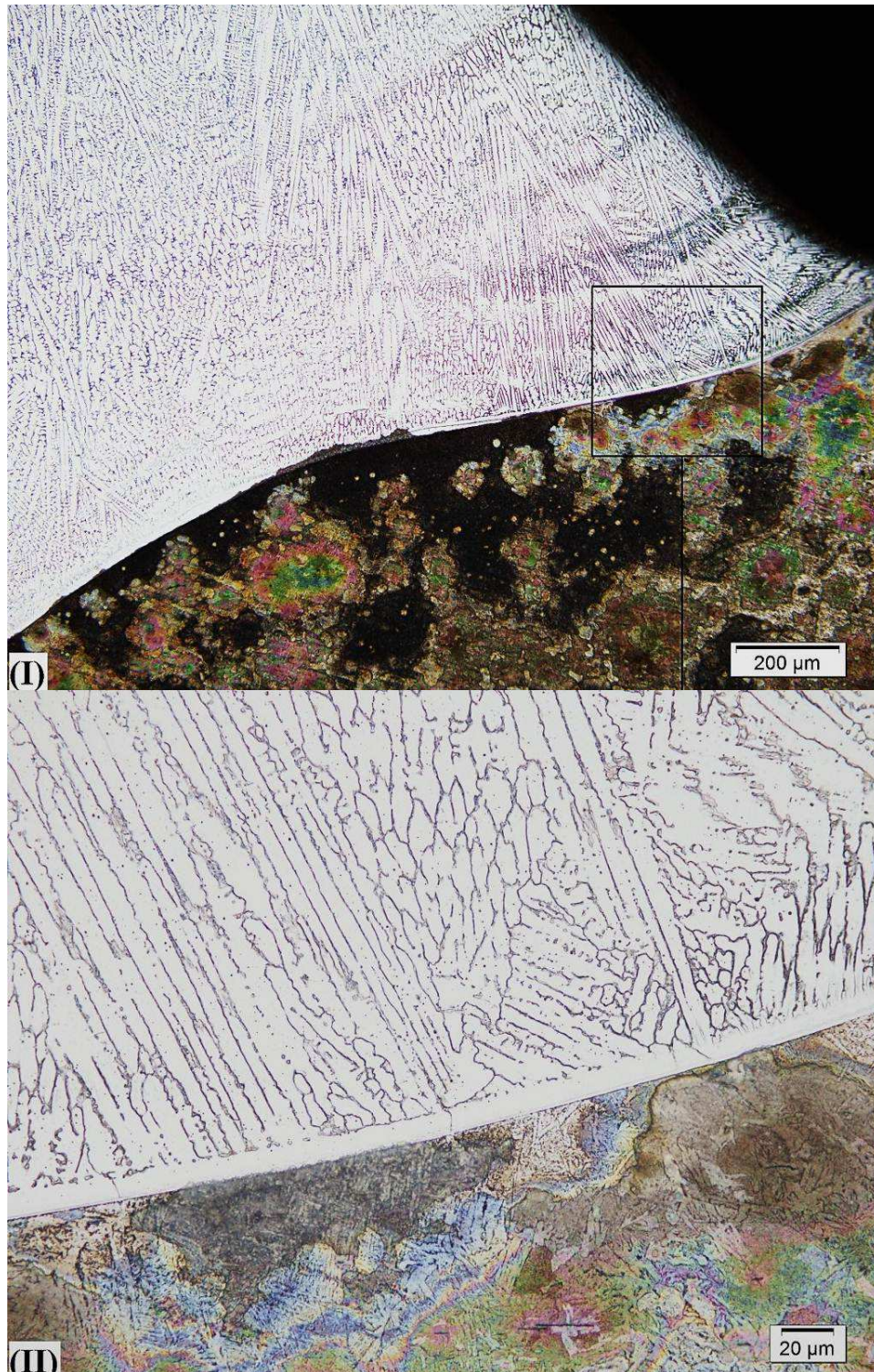


Figura 4.12 – Corpo de prova 1, imagens de micrografia (I) e (II) da zona fundida, região da linha de fusão próxima à superfície superior do metal de base, revestimento com Stellite ECoCr-A. Microestrutura austenítica com carbonetos interdendríticos, com solidificação planar a partir do metal de base, seguida por grãos colunares.

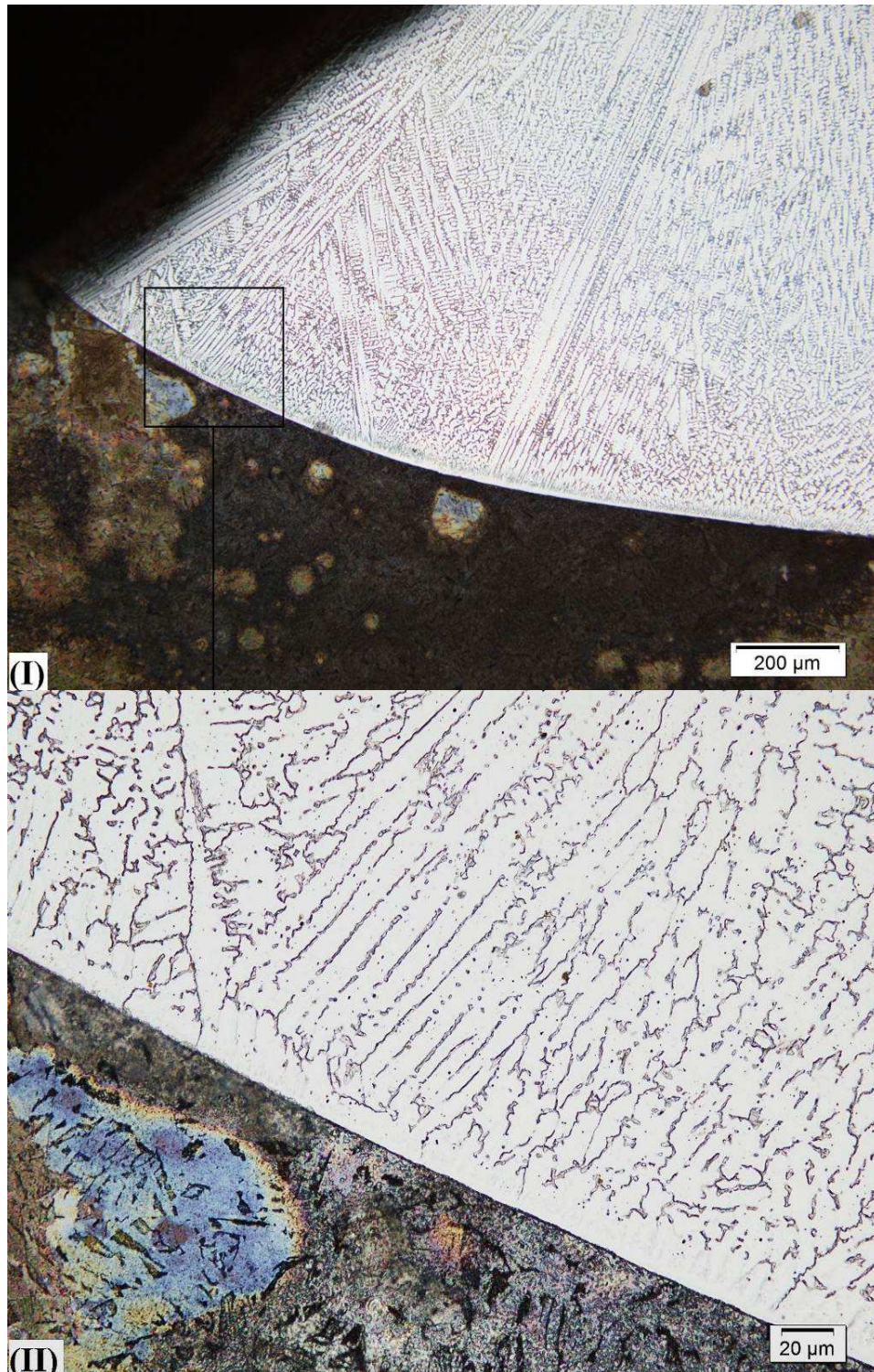


Figura 4.13 – Corpo de prova 2, imagens de micrografia (I) e (II) da zona fundida, região da linha de fusão próxima à superfície superior do metal de base, revestimento com Stellite ECoCr-A. Microestrutura semelhante ao corpo de prova 1, apresentando faixa menor de solidificação planar.

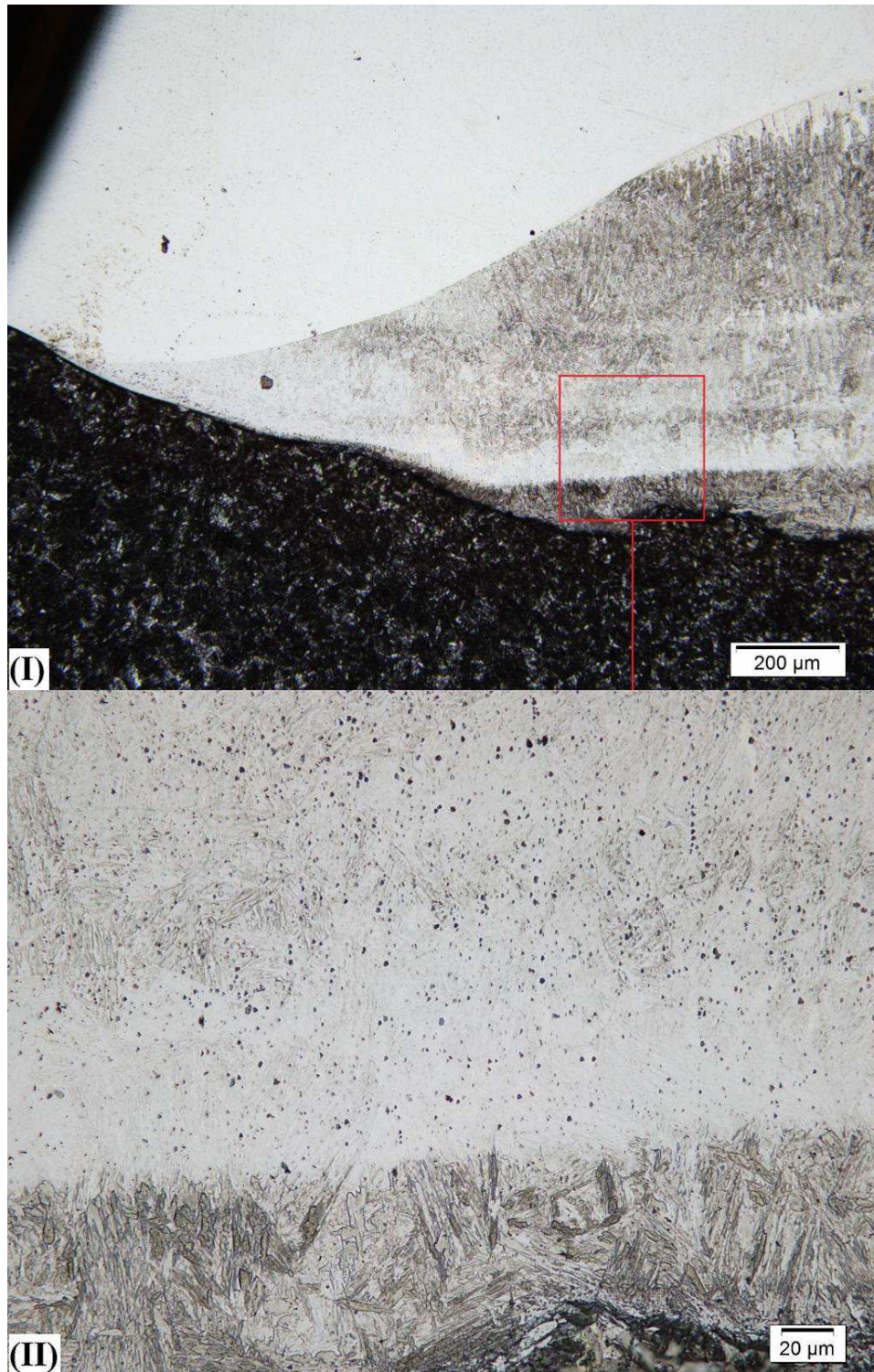


Figura 4.14 – Corpo de prova 3, imagens de micrografia (I) e (II) da zona fundida, região da linha de fusão entre metal de base e primeira camada composta de E309-16. Microestrutura refinada, semelhante a martensita, na região inferior da imagem (II). Apresenta região não atacada.

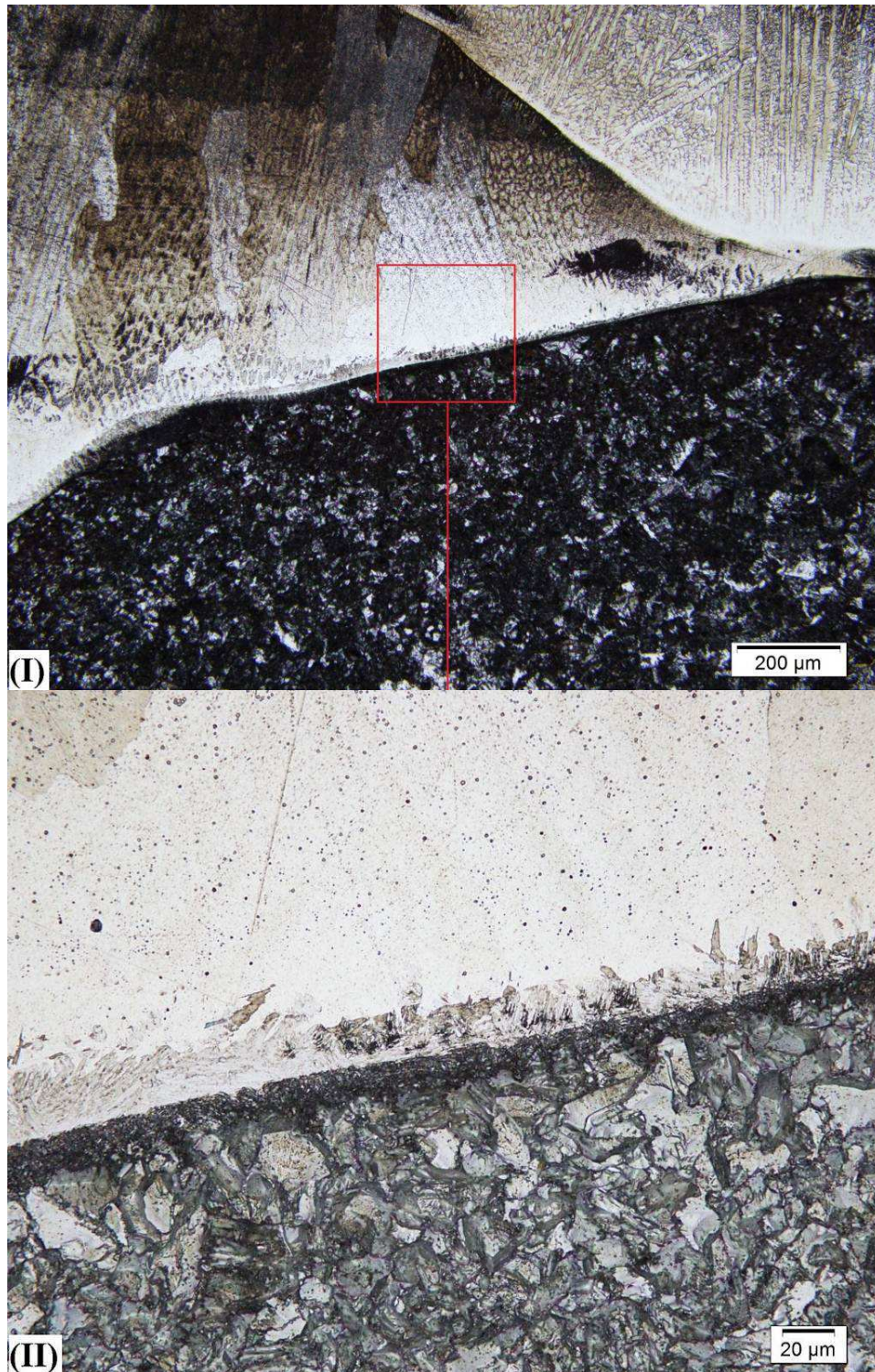


Figura 4.15 – Corpo de prova 4, imagens de micrografia (I) e (II), região da linha de fusão entre metal de base e E309-16. Microestrutura com pouca revelação, aparentando possuir martensita em alguns locais.

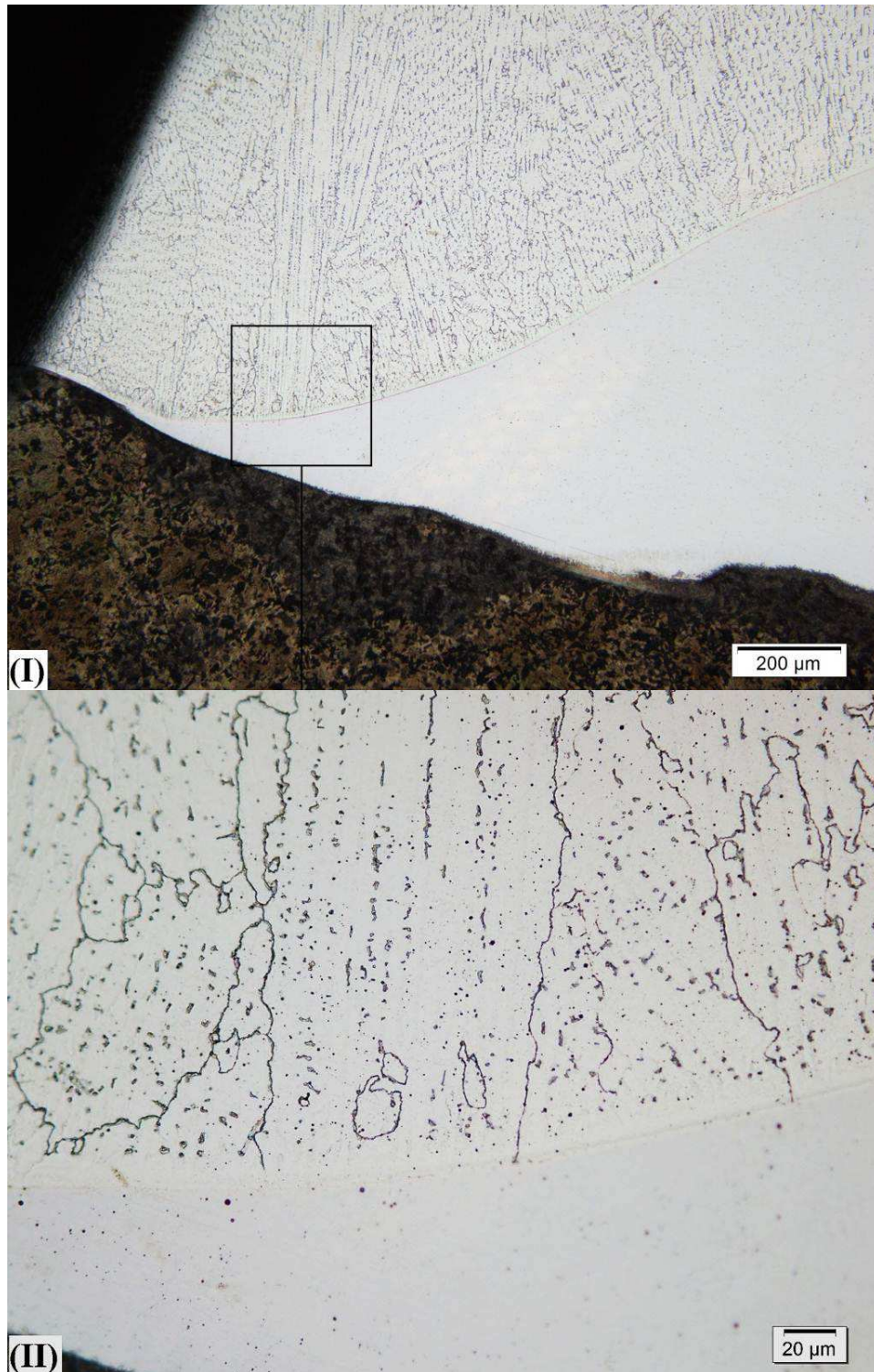


Figura 4.16 – Corpo de prova 3, imagens de micrografia (I) e (II) da zona fundida, região da linha de fusão entre E309-16 (área clara inferior, não atacada) e Stellite RCoCr-A (área superior, atacada). Microestrutura austenítica com carbonetos interdendríticos.

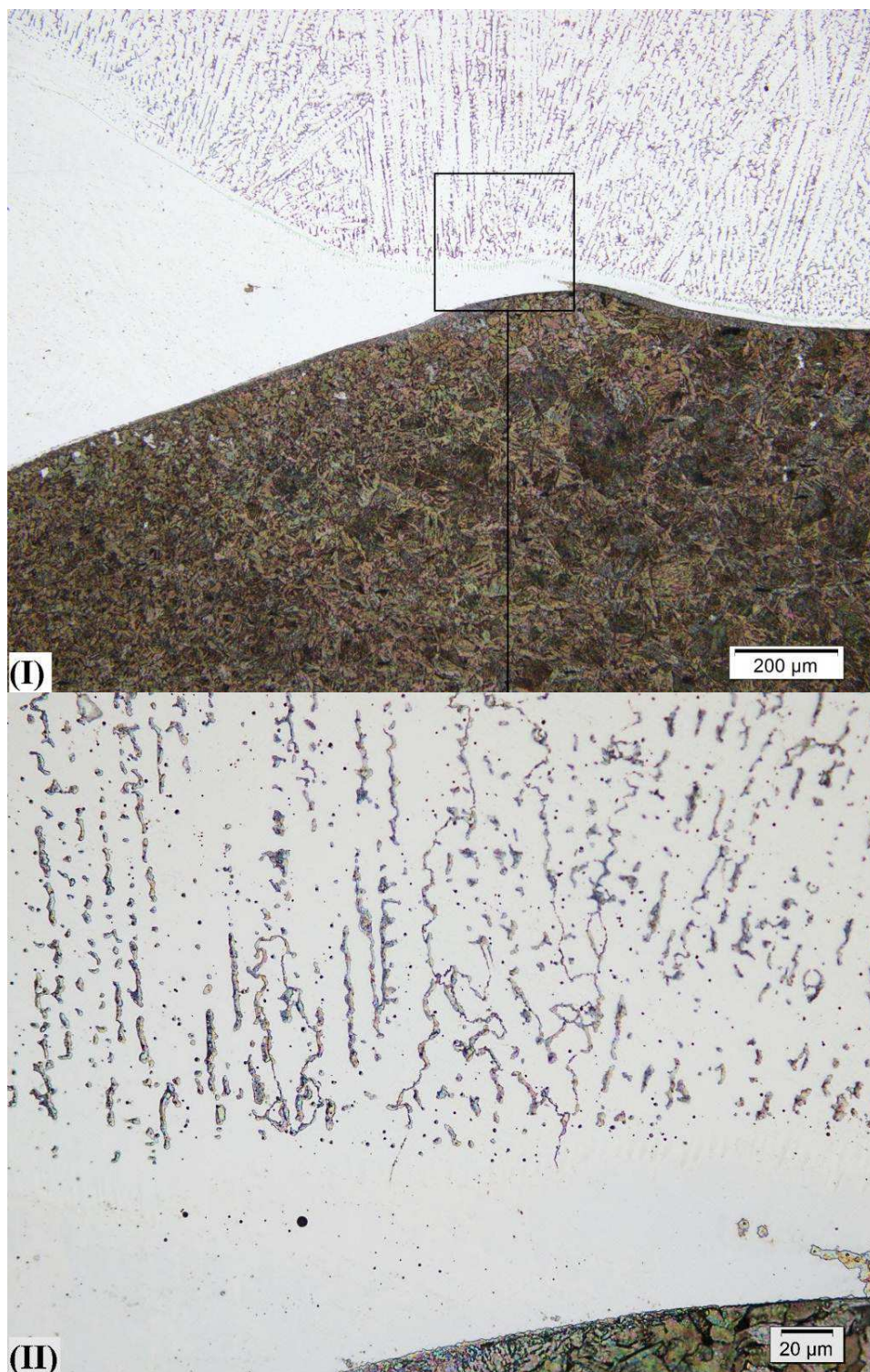


Figura 4.17 – Corpo de prova 4, imagens de micrografia (I) e (II) da zona fundida, região da linha de fusão entre E309-16 (área clara inferior, não atacada) e Stellite RCoCr-A (área superior, atacada).

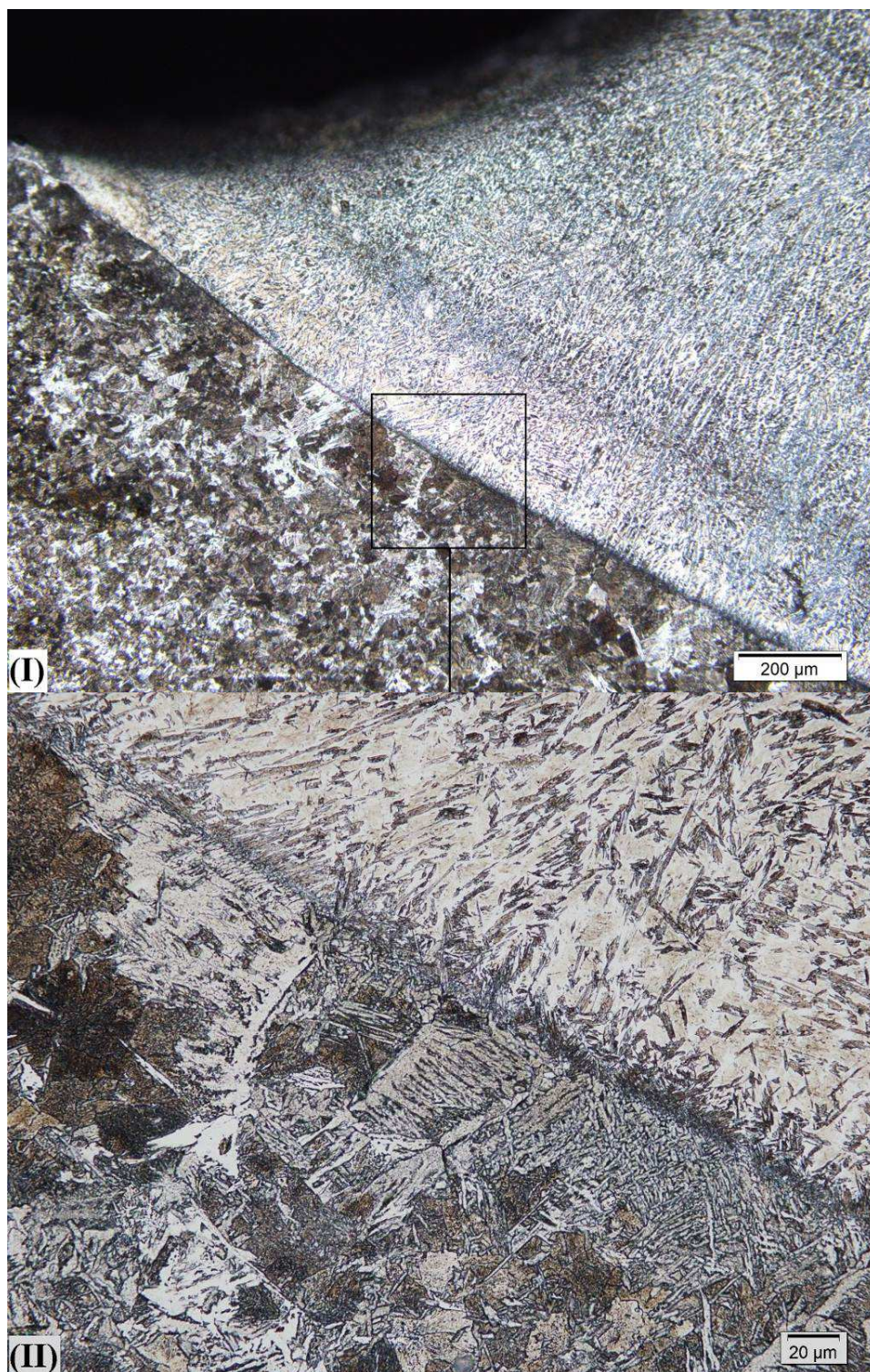


Figura 4.18 – Corpo de prova 5, imagens de micrografia (I) e (II) da zona fundida, região da linha de fusão próxima à superfície superior do metal de base, revestimento com Eutrode 536.
Microestrutura martensítica.

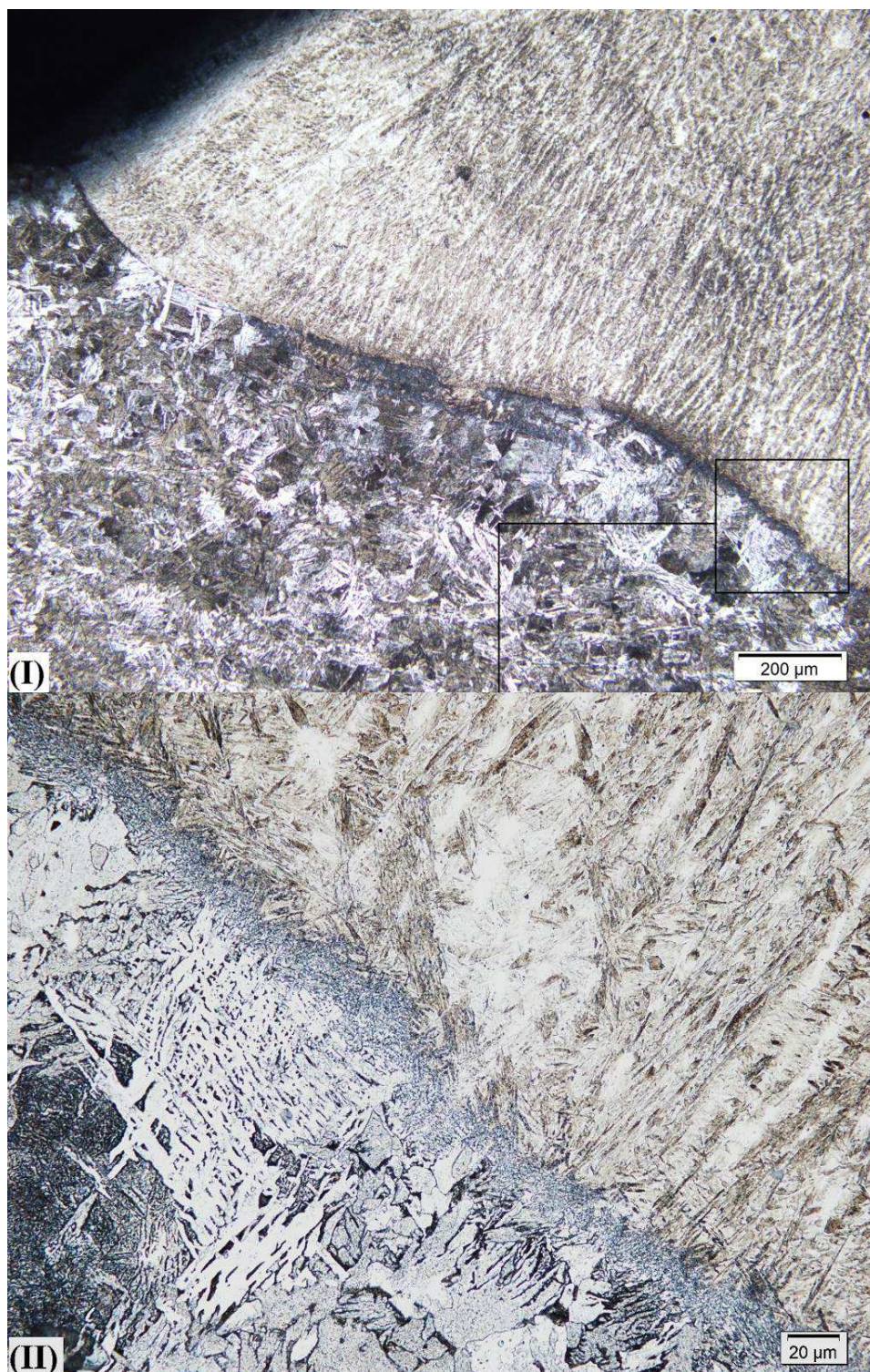


Figura 4.19 – Corpo de prova 6, imagens de micrografia (I) e (II) da zona fundida, região da linha de fusão próxima à superfície superior do metal de base, revestimento com Eutectrode 536.
Microestrutura martensítica.

4.5.4 Ensaios de Durezas

Com base nas premissas levantadas no início deste estudo, as análises de dureza realizadas envolveram o metal de base e o revestimento. Todos os ensaios foram realizados com equipamento de microdureza em escala Vickers, com carga de 300 gramas.

Devido a necessidade de verificação das durezas de acordo com a norma NACE SP0296-2010, para previsão de danos por SSC, diversos pontos de análise foram executados na fronteira das linhas de fusão, no metal de base. Os valores de dureza obtidos variam entre 230 HV e 180 HV, sendo que estas oscilações ocorreram da mesma forma para todos os corpos de prova, seguindo um mesmo comportamento – valores maiores de dureza em regiões de grãos grosseiros, não afetadas pela ZTA do cordão posterior, e valores menores de dureza em regiões de grãos refinados, afetadas pela ZTA do cordão posterior.

Uma vez feita a análise para previsão de danos por SSC, a execução de um perfil de dureza para cada corpo de prova foi realizado, partindo do metal de base e seguindo em direção ao revestimento executado. Devido às dimensões de cada camada de solda, o número total de pontos de análise para cada corpo de prova apresentou alguma variação, justificada pela finalidade de se evitar grandes distâncias entre os locais de medição. As imagens com os locais de ensaio, assim como os valores obtidos, são apresentados a seguir.

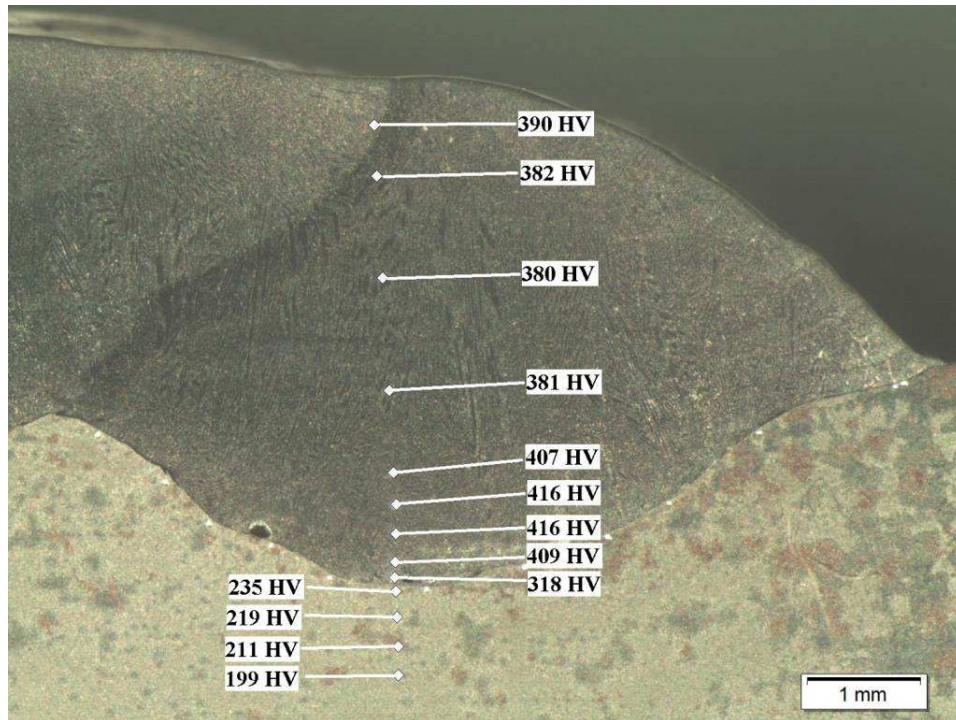


Figura 4.20 – Corpo de prova 1, ensaio de dureza Vickers no metal de base e zona fundida do cordão inicial, camada de ECoCr-A.

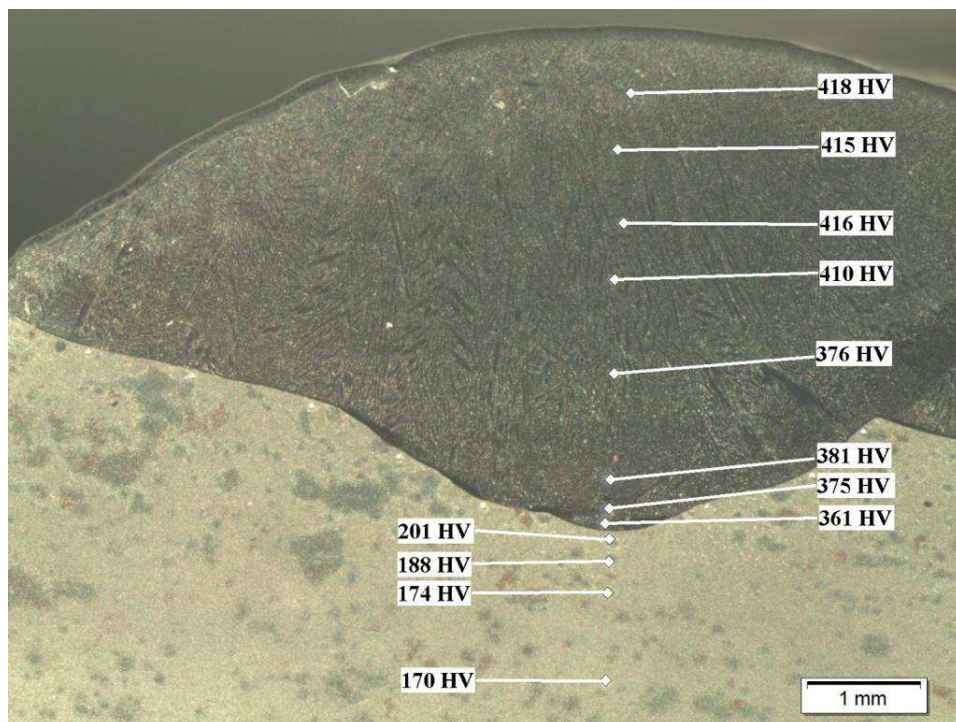


Figura 4.21 – Corpo de prova 2, ensaio de dureza Vickers no metal de base e zona fundida do cordão final, camada de ECoCr-A.

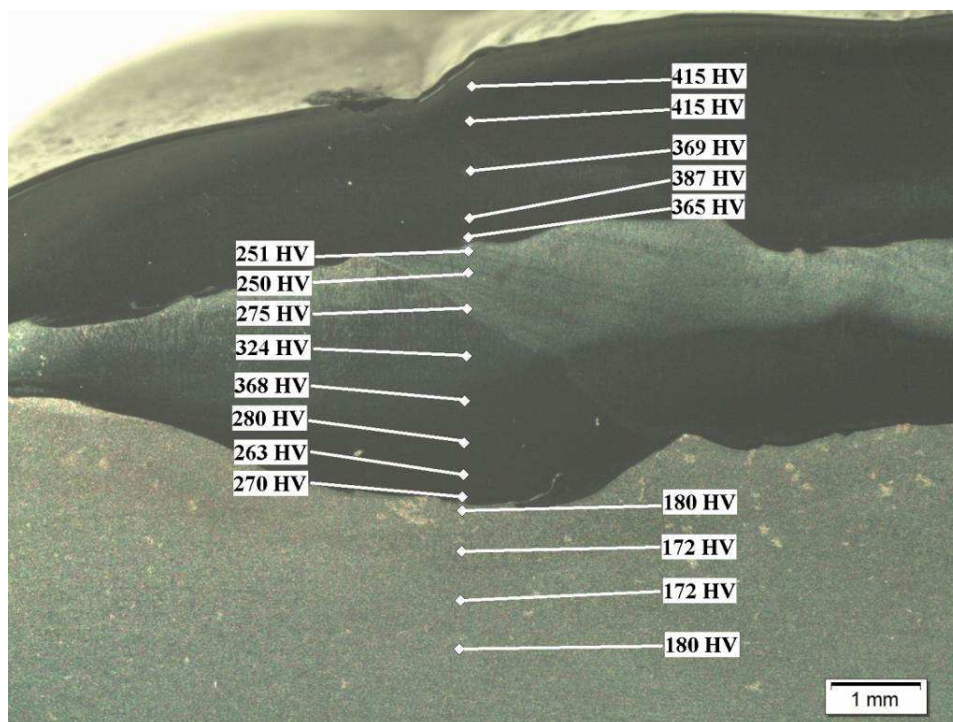


Figura 4.22 – Corpo de prova 3, ensaio de dureza Vickers no metal de base e zonas fundidas, com primeira camada de E309-16 e segunda camada de RCoCr-A. Cordões iniciais.

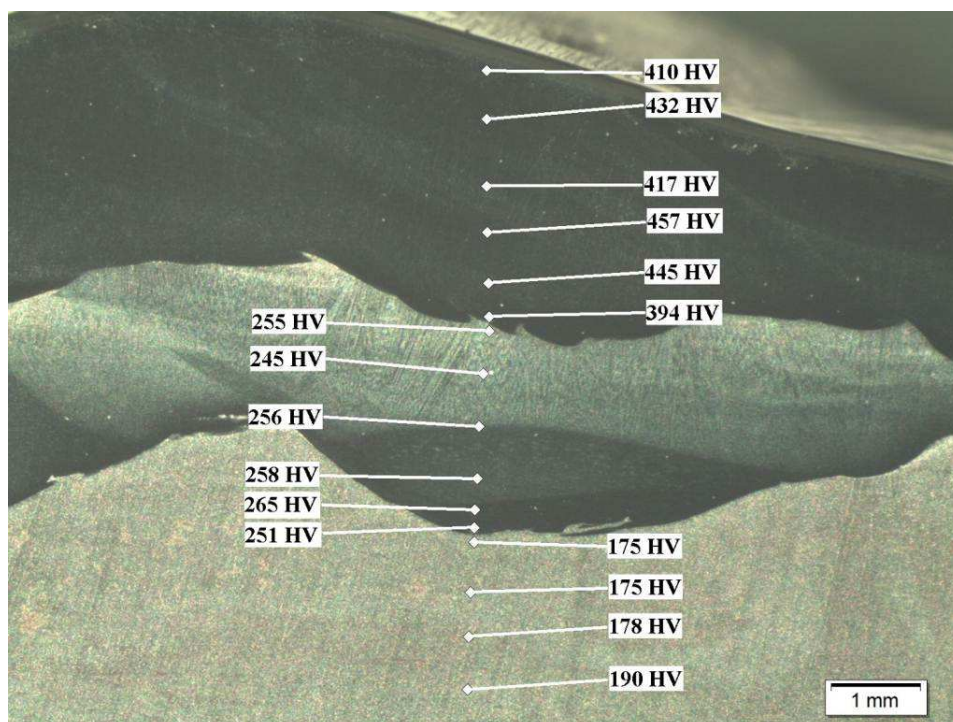


Figura 4.23 – Corpo de prova 4, ensaio de dureza Vickers no metal de base e zonas fundidas, com primeira camada de E309-16 e segunda camada de RCoCr-A. Cordões finais.

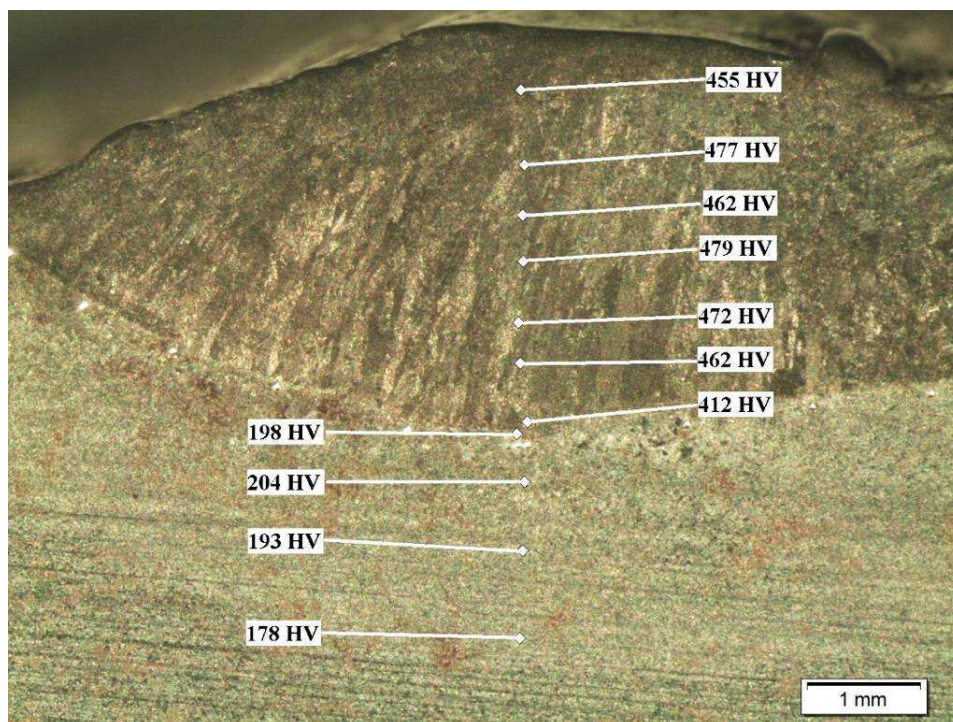


Figura 4.24 – Corpo de prova 5, ensaio de dureza Vickers no metal de base e zona fundida, com camada de Eutectrode 536. Cordão inicial.

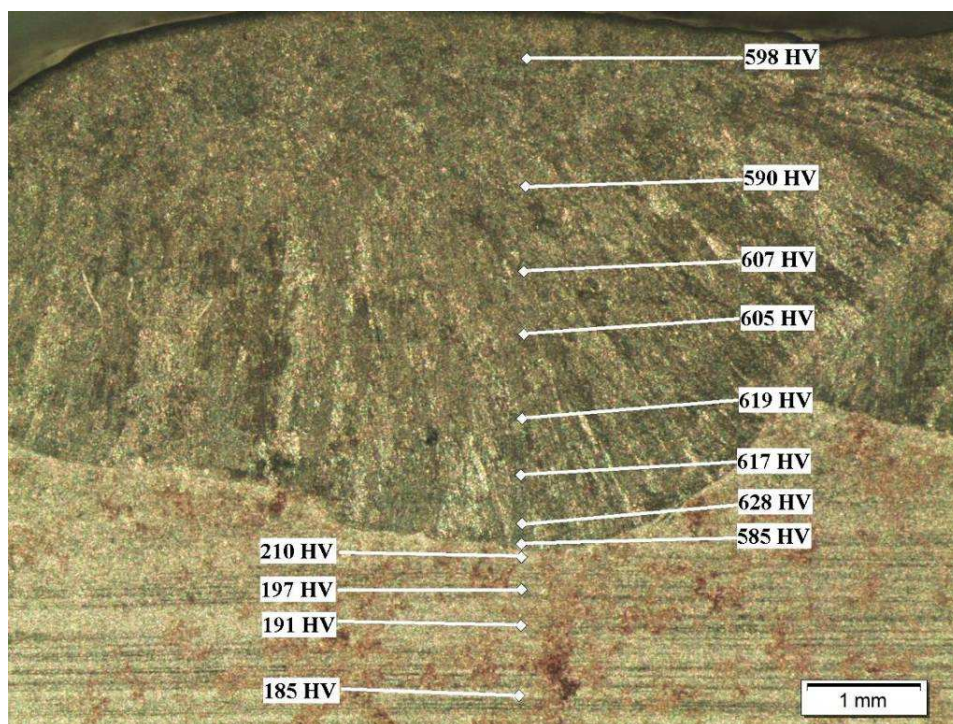


Figura 4.25 – Corpo de prova 6, ensaio de dureza Vickers no metal de base e zona fundida, com camada de Eutectrode 536. Cordão final.

4.6 Composição Química

Utilizando o equipamento de análise de ligas portátil XRF DELTA (OLYMPUS NDT), pelo método de espectrometria de raios X, foi possível obter a composição química média dos revestimentos aplicados. Tal método, em comparação ao método de cálculo por diluição, evita erros associados às áreas visíveis dos cordões de solda, que além do metal de base, também engloba material do cordão anterior. Assim, a determinação da contribuição do cordão anterior seria dificultada por não existir uma referência de área original.

Os valores das composições químicas são apresentadas a seguir.

Tabela 4.5 – Valores de composição química obtidos com o analisador de ligas portátil por raios X.

Elemento Químico (%)	Amostra "A"	Amostra "B"	Amostra "C"
Cr	23,1	25,4	9,0
Co	43,5	40,7	-
Fe	27,0	25,2	87,1
S	0,4	0,5	0,3
Mn	0,3	0,4	0,2
Si	-	-	1,0
Ti	0,2	0,4	0,2
P	0,2	-	0,1
W	4,4	3,7	-
Ni	-	2,3	-

5 DISCUSSÕES E RESULTADOS

5.1 Propriedades Químicas

As análises de composição química realizadas nos corpos de prova demonstram que o revestimento executado em Eutectrode 536 apresenta quantidade de cromo abaixo do esperado. Um valor, para o caso estudado, de no mínimo 12% de cromo é necessário para garantir que o revestimento irá apresentar uma capacidade mínima de resistência à corrosão por oxidação (umidade) e por H₂S. Ligas de aço com percentuais de cromo menores que o citado apresentam uma camada passiva de óxido de cromo não homogênea, e assim perdem a qualidade de inoxidáveis. Devido a este fato, a liga Eutectrode 536, para os parâmetros de soldagem utilizados, não deve ser aplicada no caso em estudo, independentemente de sua capacidade de resistir aos demais mecanismos de desgaste associados. Por se tratar de um aço martensítico, a resistência a abrasão tende a ser elevada, entretanto a resistência a erosão deve ser definida em ensaios específicos.

Já as demais ligas utilizadas apresentam revestimentos com valores aceitáveis de cromo em sua composição, suficientes para resistir ao mecanismo de corrosão. Outros elementos químicos também se apresentam em grandes quantidades para os parâmetros de soldagem utilizados, como o cobalto e o tungstênio, gerando uma matriz austenítica e de dureza elevada. Assim, tais ligas também tendem a apresentar uma resistência elevada aos desgastes por erosão e abrasão.

Todos os valores de composição química apresentados estão atrelados à diluição obtida pelo processo de soldagem. Assim, o planejamento e controle dos parâmetros de soldagem tendem a melhorar as composições químicas dos revestimentos, como também resultar em redução das tensões térmicas envolvidas. Um exemplo concreto é a diminuição do aporte térmico, seja por redução das correntes de soldagem ou aumento da velocidade de avanço, reduzindo a penetração e, conseqüentemente, a diluição. Tal ação poderia, inclusive, devolver a viabilidade ao revestimento realizado com Eutectrode 536, em relação à concentração de cromo. Estas variações nos parâmetros de soldagem devem ser estudadas, testadas e

controladas pois podem prejudicar a soldabilidade durante o processo de revestimento, assim como ocasionar falta de fusão com o substrato.

5.2 Microestruturas e Durezas

A primeira análise de durezas ao longo da linha de fusão, no metal de solda, indicou valores que variam entre 230 HV (granulometria grosseira) e 180 HV (granulometria fina). A princípio, tal comportamento não segue o previsto em literatura para aços ao carbono, que observa valores menores de dureza em microestrutura de grãos grosseiros. Entretanto, as análises encontradas a respeito do tema utilizam aços submetidos a tratamentos de normalização e recozimento, gerando microestruturas diferentes das observadas ao longo das linhas de fusão nos corpos de prova deste estudo. A ocorrência de ciclos térmicos nestas regiões leva a formação de maiores quantidades de perlita, assim como bainita e ferrita alinhada, justificando os valores encontrados. Em relação à fragilização e danos por SSC, as durezas encontradas não representam risco, tomando como base a orientação da norma NACE SP0296-2010.

Os revestimentos realizados com uma camada inicial de E309-16 apresentaram comportamento diferente do esperado. Na etapa de ataque químico para revelação de microestruturas, apenas algumas áreas foram expostas, mesmo após diversas tentativas. Algumas áreas próximas ao metal de base, como exposto na Figura 4.14, aparentam possuir martensita.

Verificando as imagens de macrografia, é visível que a diluição do E309-16 é elevada. Para fins de cálculo e averiguação no diagrama de Schaeffler, podemos estimá-la em 40%, assim como cromo equivalente em 24,90% e níquel equivalente em 17,65% do metal de adição. Para o metal de base, o cromo equivalente fica em 0,6% e níquel equivalente em 7,65%. Assim, temos uma liga com cromo equivalente em 15,18% e níquel equivalente em 13,65%. Aplicando os dados no diagrama de Schaeffler, verifica-se que a previsão para a zona fundida é de um aço austenítico com presença de martensita em quantidade de aproximadamente 20%, como apresentado na Figura 5.1.

O ensaio de durezas detectou apenas uma região de alta dureza, no corpo de prova 03, com valor próximo de 370 HV. Todos os demais valores obtidos não caracterizam martensita, indicando que a diluição ficou pouco abaixo dos 40% estimados inicialmente.

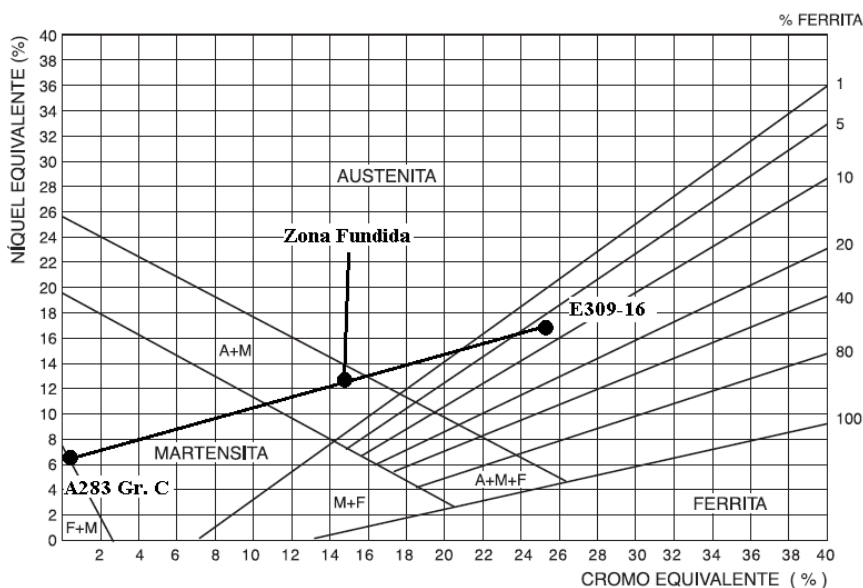


Figura 5.1 – Previsão da microestrutura da zona fundida, através do diagrama de Schaffler.

As ligas de Stellite apresentaram microestrutura dentro da previsão, com matriz austenítica e fase interdendrítica composta por carbonetos metálicos. A dureza média obtida foi de 400 HV, cumprindo a previsão anunciada pelo fabricante, que era de 40 HRC (aproximadamente 400 HV).

Nos corpos de prova revestidos com Eutectrode, a microestrutura se caracteriza por formação uniforme de martensita na zona fundida. As durezas, entretanto, apresentam variações consideráveis entre os corpos de prova. No cordão inicial (corpo de prova 5), os valores encontrados giram em torno de 470 HV, enquanto no cordão final os valores ultrapassam 600 HV, como previsto pelo fabricante (55 HRC). Tal comportamento pode ser explicado pela região onde o perfil de durezas foi executado, no caso do primeiro cordão. Pelo fato de estar localizado próximo ao segundo cordão, a ZTA deste último, através do ciclo térmico, pode ter gerado um efeito de revimento, levando a durezas menores.

5.3 Descontinuidades

Através das imagens realizadas por macrografia, é possível visualizar que apenas o corpo de prova 1 apresenta porosidade muito próxima à linha de fusão, onde os únicos dois poros são evidenciados pelas Figuras 4.7 e 4.8. Em nenhum outro corpo de prova foi encontrado qualquer outro tipo de defeitos metalúrgicos, tanto entre metal depositado e metal de base quanto entre cordões.

6 CONCLUSÃO

O estudo desenvolvido demonstra que, em relação à possibilidade de danos por SSC, todos os corpos de prova não apresentam, no metal de base, valores de dureza superiores a 248 HV para os parâmetros de soldagem utilizados. Assim, todos os revestimentos, neste aspecto, podem ser utilizados para as previsões iniciais – processo manual e sem controle de aporte térmico – atendendo os parâmetros solicitados pela norma NACE SP0296-2010.

Em relação à capacidade de resistir aos mecanismos de desgaste, todos os revestimentos apresentam durezas elevadas, suficientes para demonstrar bom desempenho contra abrasão, sendo necessário executar ensaios específicos para determinar o desempenho contra erosão. Em relação à resistência à corrosão, as quantidades de cromo presentes, devido à diluição, encontram-se inferiores em comparação com os valores dos metais de adição, sendo que no caso do revestimento executado com eutectrode este valor o torna inviável para resistir ao H₂S. Um controle dos parâmetros de soldagem com a finalidade de diminuir a diluição deve levar a um melhor desempenho de todos os metais de adição, e também devolver a viabilidade do Eutectrode.

A microestrutura dos revestimentos com Stellite apresenta matriz austenítica e fase interdendrítica de carbonetos, não apresentando diferenças em relação ao previsto em literatura. São visíveis os modos de solidificação envolvidos, inicialmente por uma frente de solidificação planar, seguida por grãos colunares alinhados. Também não apresenta variação a microestrutura do revestimento executado com Eutectrode, constituído por uma matriz martensítica, apenas ocorrendo variação nos valores de dureza entre o primeiro e último cordão.

A microestrutura do revestimento executado com E309-16 não é clara, demonstrando locais com austenita, ferrita e martensita. Conforme o previsto pelo diagrama de Schaeffler, é previsto a presença de martensita em pequenas quantidades devido à diluição, sendo que apenas um local no ensaio de durezas detectou valor próximo de 370 HV, caracterizando sua presença. Um melhor procedimento de revelação das microestruturas deve ser investigado para o caso, assim como mais perfis de dureza realizados, com distâncias menores entre os pontos.

Nenhum problema metalúrgico grave foi detectado pelas análises, como trincas, segregações e falta de fusão. Apenas dois poros são visualizados no corpo de prova 1, entretanto suas dimensões não implicam em modificação no desempenho do revestimento. Sua proximidade com as linhas de fusão deve ser estudada para definir a possibilidade de falha e consequente destacamento do revestimento.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVISI, P. P. “Nota sobre a seleção do aço para o serviço com H₂S”. 2010.

CASTOLIN EUTETIC, Catálogo técnico. “Eutectrode 536 – Folheto técnico do produto”. 2013.

ESAB, Catálogo técnico. “Eletrodos Inoxidáveis”. 2013.

GARCIA, N. D. “Soldagem MIG com arame frio aplicada ao revestimento de chapas planas com uma superliga de níquel tipo hastelloy C-276”. 2011.

INFOSOLDA¹. “REVESTIMENTO POR SOLDAGEM – CARACTERÍSTICAS”. Acesso em Julho de 2013.

<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/177-revestimento-por-soldagem-caracteristicas.html>

INFOSOLDA². “REVESTIMENTO POR SOLDAGEM - PROCESSOS DE SOLDAGEM PARA REVESTIMENTO”. Acesso em Julho de 2013.

<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/180-revestimento-por-soldagem-processos-de-soldagem-para-revestimento.html>

INFOSOLDA³. “REVESTIMENTO POR SOLDAGEM - LIGAS PARA REVESTIMENTO”. Acesso em Julho de 2013.

<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/178-revestimento-por-soldagem-ligas-para-revestimento.html>

KESTRA, Catálogo técnico. “Consumíveis Especiais de Soldagem – rev. 04”. 2013.

NACE INTERNATIONAL SP0296-2010. “Standard Practice – Detention, repair and mitigation of cracking in refinery equipment in wet H₂S environments”.

SILVA, C. C.; AFONSO, C. R. M.; RAMIREZ, A. J.; MOTTA, M. F.; MIRANDA, H. C.; FARIAS, J. P.; “Aspectos metalúrgicos de revestimentos dissimilares com a superliga a base de níquel Inconel 625”. 2012.

WILL, C. R. “Ligas inoxidáveis resistentes à cavitação depositadas por plasma – PTA – ARAME”. 2008.