

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

MARIANA CARLA MENDES RODRIGUES

CARACTERIZAÇÃO DE AÇOS FERRAMENTA USADOS EM CILINDROS DE
LAMINAÇÃO A FRIO DE PERFIS

BELO HORIZONTE

2014

MARIANA CARLA MENDES RODRIGUES

**CARACTERIZAÇÃO DE AÇOS FERRAMENTA USADOS EM CILINDROS DE
LAMINAÇÃO A FRIO DE PERFIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Elaine Carballo Siqueira Corrêa

BELO HORIZONTE

2014

MARIANA CARLA MENDES RODRIGUES

**CARACTERIZAÇÃO DE AÇOS FERRAMENTA USADOS EM CILINDROS DE
LAMINAÇÃO A FRIO DE PERFIS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Graduação em Engenharia de Materiais, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em 01 de agosto de 2014.

Por:

Prof^ª. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa
Orientadora

Prof. Dr. Wellinton Lopes
Coorientador

Prof. M.Sc. Wanderlei Ferreira de Freitas

Eng. Grazielle Gianini Braga Maria

*Dedico este trabalho aos meus
pais, Renato e Liliane, pelo amor,
apoio e incentivo; e ao Caio pelo
companheirismo e compreensão de
sempre.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela sabedoria, força, fé, foco e equilíbrio em todos os momentos de minha vida.

Aos meus pais por todo incentivo que me deram e por sempre acreditarem e confiarem em mim.

Aos meus irmãos Júlio e André pela fraternidade e carinho.

Ao Caio pelos 8 anos de companheirismo, compreensão e amor incondicional.

A minha orientadora Prof^a. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa e ao meu co-orientador Prof. Dr. Wellington Lopes, pelos ensinamentos, orientação, apoio, paciência e dedicação que sempre demonstraram durante toda a execução deste trabalho.

Aos colegas da BBA pela convivência, em especial ao Geraldo Gomes, meu supervisor de estágio, pelos ensinamentos, total suporte e conhecimentos compartilhados, e ao Rodrigo Kafke, pela confiança depositada em mim e por me dar a chance de compor e ajudar a equipe do GATC/GPRO.

Ao CEFET-MG pela estrutura proporcionada e pelo conhecimento que adquiri durante todos os anos da graduação.

*"A mente que se abre a uma nova ideia
jamais voltará ao seu tamanho
original".*

Albert Einstein

RESUMO

Com o constante crescimento do mercado mundial acompanhado da exigência de produtos com propriedades cada vez melhores, produtos feitos de aço vêm sendo amplamente utilizados em diversos segmentos da sociedade, principalmente nos setores da construção civil e automotivo. Nesse cenário, os perfis laminados também ganham destaque, sendo empregados em pilares, vigas, estacas de fundação, elementos de ligação entre peças, etc, bem como em tubulações rígidas (perfil tubular) e flexíveis (perfil Z) de extração de petróleo. No Brasil, o destaque de tais produtos vem sendo ainda maior devido à realização de eventos no país, como a Copa do Mundo de 2014 e as Olimpíadas de 2016, o que demanda grandes investimentos na construção civil. Além disso, avanços na indústria petrolífera brasileira com a descoberta do Pré-Sal, também tem estimulado o uso de perfis laminados em tubulações. A laminação a frio de produtos não-planos envolve muito mais variáveis de processo do que a laminação a frio de planos, demandando um rígido controle das mesmas para que o perfil atinja as dimensões e as propriedades requeridas. Uma dessas variáveis são os cilindros de laminação, considerados elementos críticos do processo, podendo apresentar baixa vida útil. Essa baixa vida útil se deve a problemas de desgastes abrasivo ou adesivo, fadiga, deformações plásticas ou lascamentos, falhas muito comuns nos cilindros de laminação. O objetivo geral deste trabalho foi fazer a caracterização de aços usados em cilindros de laminação a frio de perfis, mais especificamente, dos aços VD2 (nacional da Villares), QCM8 (importado da Sanyo Steel), Sleipner (importado da Uddeholm) e VF800 (nacional da Villares). Para isso, foram feitas análises de dureza, microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura, espectroscopia por energia dispersiva, espectroscopia de emissão atômica por plasma e rugosidade. Ao final desse estudo, uma comparação entre as propriedades dos aços foi conduzida visando concluir qual deles era o mais adequado para a referida aplicação.

Palavras-chave: Aço, laminação a frio, perfis laminados, cilindros de laminação.

ABSTRACT

With the steady growth of worldwide market, together with the demand of products with ever-improving properties, products made of steel have been widely used in various segments of society, especially in the branch of construction and the automotive sector. In this scenario, rolled shapes also are highlighted, being used in pillars, beams, foundation piles, connecting elements between parts, etc., as well as in rigid piping (tubular shapes) and flexible (Z shape) of oil extraction. In Brazil, the highlight of such products has been increasing by the realization of events in the country, as the World Cup in 2014 and the Olympic Games in 2016, which demands large investments in constructions. Moreover, advances in the Brazilian Oil Industry, with the discovery of Pre-Salt, have also been stimulating the use of rolled shapes in pipes. Cold rolling of non-flat products involves more process variables than cold rolling of flat products, requiring tight control of the same in order to the shape reaches the required dimensions and properties. One of these variables are the rolling mill rolls, considered critical elements of the process, which may have short lifetime. This short life is due to problems such as abrasive wear, adhesive wear, fatigue, plastic deformation or chipping, very common flaws in rolling mill rolls. The aim of this work was to characterize steels used in cold rolling mill rolls of shapes, more specifically, steels VD2 (national from Villares), QCM8 (imported from Sanyo Steel), Sleipner (imported from Uddeholm) and VF800 (national from Villares). For this, analyzes of hardness, optical microscopy, scanning electron microscopy, plasma atomic emission spectroscopy, energy dispersive microscopy and roughness were done. At the end of this study, a comparison between the properties of those steels was performed to conclude which one was best suited for that kind of application.

Keywords: Steel, cold rolling mill, rolled shapes, rolling mill rolls.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração do processo de laminação	15
Figura 2 – Cilindros de um laminador fixo durante a operação com variação de perfil ao longo do comprimento	16
Figura 3 – Alguns tipos de perfis	18
Figura 4 – Laminação de barras e perfis	19
Figura 5 – Típico laminador duo com cilindro regulável durante a operação com vista lateral do quadro aberto e fechado	20
Figura 6 – Tipos de laminadores	21
Figura 7 – Partes de um cilindro de laminação.....	22
Figura 8 – Distribuição esquemática de carbonetos em aços ferramenta para trabalho a frio em função do tipo de fabricação.....	27
Figura 9 – Fluxograma da caracterização realizada nos aços	31
Figura 10 – Curva de revenimento do aço VD2.....	32
Figura 11 – Curva de revenimento do aço Sleipner	34
Figura 12 – Curva de revenimento do aço VF800	35
Figura 13 – Representação esquemática dos pontos onde as durezas foram medidas.....	37
Figura 14 – Durômetro IGV® modelo RM 401/A usado no teste de dureza	37
Figura 15 – Equipamentos usados na análise de microscopia óptica.....	38
Figura 16 – Representação esquemática das regiões em que foram obtidas as imagens microestruturais.....	39
Figura 17 – Montagem das amostras no porta-amostras.....	39
Figura 18 – Equipamentos usados nas análises de microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia por energia dispersiva.....	40
Figura 19 – Comparação da rugosidade média obtida para cada cilindro	41
Figura 20 – Perfil de dureza do aço VD2.....	46
Figura 21 – Perfil de dureza do aço QCM8.....	47
Figura 22 – Perfil de dureza do Sleipner	47
Figura 23 – Perfil de dureza do aço VF800	48
Figura 24 – Comparação do perfil de dureza entre todos os aços analisados.....	48
Figura 25 – Micrografias (MO e MEV) do aço VD2 – Amostra 1 (superfície)	50
Figura 26 – Micrografias (MO e MEV) do aço VD2 – Amostra 2	51
Figura 27 – Micrografias (MO e MEV) do aço VD2 – Amostra 3	52
Figura 28 – Micrografias (MO e MEV) do aço VD2 – Amostra 4	53
Figura 29 – Micrografias (MO e MEV) do aço QCM8 – Amostra 1 (superfície)	54
Figura 30 – Micrografias (MO e MEV) do aço QCM8 – Amostra 2	55
Figura 31 – Micrografias (MO e MEV) do aço QCM8 – Amostra 3	56
Figura 32 – Micrografias (MO e MEV) do aço QCM8 – Amostra 4	57
Figura 33 – Micrografias (MO e MEV) do aço Sleipner – Amostra 1 (superfície).....	58

Figura 34 – Micrografias (MO e MEV) do aço Sleipner – Amostra 2.....	59
Figura 35 – Micrografias (MO e MEV) do aço Sleipner – Amostra 3.....	60
Figura 36 – Micrografias (MO e MEV) do aço Sleipner – Amostra 4.....	61
Figura 37 – Micrografias (MO e MEV) do aço VF800 – Amostra 1 (superfície).....	62
Figura 38 – Micrografias (MO e MEV) do aço VF800 – Amostra 2.....	63
Figura 39 – Micrografias (MO e MEV) do aço VF800 – Amostra 3.....	64
Figura 40 – Micrografias (MO e MEV) do aço VF800 – Amostra 4.....	65
Figura 41 – Resultado da análise de EDS do aço VD2	71
Figura 42 – Resultado da análise de EDS do aço QCM8	72
Figura 43 – Resultado da análise de EDS do aço Sleipner.....	73
Figura 44 – Resultado da análise de EDS do aço VF800.....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química nominal do aço VD2 em % em massa	31
Tabela 2– Composição química nominal do aço QCM8 em % em massa	33
Tabela 3 – Composição química nominal do aço Sleipner em % em massa.....	33
Tabela 4 – Composição química nominal do aço VF800 em % em massa.....	35
Tabela 5 – Resultado da análise química do aço VD2 em % em massa	41
Tabela 6 – Resultado da análise química do aço QCM8 em % em massa	41
Tabela 7 – Resultado da análise química do aço Sleipner em % em massa.....	41
Tabela 8 – Resultado da análise química do aço VF800 em % em massa	41
Tabela 9 – Resultado da rugosidade medida em μin	43
Tabela 10 – Resultado da rugosidade medida em μm	43
Tabela 11 –Resultado das medições de dureza –Aço VD2.....	45
Tabela 12 –Resultado das medições de dureza –Aço QCM8.....	45
Tabela 13 –Resultado das medições de dureza –Aço Sleipner	45
Tabela 14 –Resultado das medições de dureza –Aço VF800	46
Tabela 15 – Identificação de carbonetos em aço-ferramenta	66
Tabela 16 – Comparação dos elementos detectados na análise de EDS de acordo com os pontos analisados – Aço VD2.....	75
Tabela 17 – Comparação dos elementos detectados na análise de EDS de acordo com os pontos analisados – aço QCM8	75
Tabela 18 – Comparação dos elementos detectados na análise de EDS de acordo com os pontos analisados – aço Sleipner	75
Tabela 19 – Comparação dos elementos detectados na análise de EDS de acordo com os pontos analisados – aço VF800	76

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.2 Objetivos	14
<i>1.2.1 Objetivo geral.....</i>	<i>14</i>
<i>1.2.2 Objetivos específicos.....</i>	<i>14</i>
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 Laminação	15
2.1.1 Laminação a frio	16
<i>2.1.1.1 Laminação não plana (de barras e perfis).....</i>	<i>18</i>
2.1.2 Laminadores	19
<i>2.1.2.1 Cilindros de laminação</i>	<i>22</i>
2.2 Aços ferramenta	23
2.2.1 Aços ferramenta para trabalho a frio.....	25
<i>2.2.1.1 Os aços para trabalho a frio e suas principais características</i>	<i>26</i>
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
3.1 Descrição geral do trabalho desenvolvido	30
3.2 Materiais	31
3.2.1 Aço VD2.....	31
3.2.2 Aço QCM8	32
3.2.3 Aço Sleipner.....	33
3.2.4 Aço VF800.....	34
3.3 Análise química	36
3.4 Avaliação superficial.....	36
3.5 Avaliação das propriedades mecânicas.....	36
3.6 Análise microestrutural.....	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1 Análise química	41
4.2 Análise de rugosidade	43
4.3 Análise de dureza	44
4.4 Análise microestrutural.....	50
4.4.1 MO e MEV.....	50
4.4.2 EDS.....	70
4.5 Análise geral dos resultados.....	77
5 CONCLUSÃO.....	80
REFERÊNCIAS	81

1 INTRODUÇÃO

O aço, devido à sua grande versatilidade e aplicabilidade, vem sendo cada vez mais empregado no Brasil e no mundo. Sua utilização tem sido fundamental em vários setores da sociedade, como em: utilidades comerciais, máquinas e equipamentos, linha branca, embalagens, tubos, e principalmente no setor automotivo e da construção civil, ocupando cerca de 24,7 % e 35,4% de todo o consumo de aço em 2012, segundo o Relatório de sustentabilidade 2013 (2013).

O Brasil a cada dia vem expressando sua força produtiva e econômica no cenário mundial, e no que diz respeito à produção de aço isso não é diferente. Em 2012, o Brasil ocupou a nona posição no ranking mundial produzindo cerca de 34,5 milhões de toneladas, com a participação de 2,2% na produção global e de 52,5% na América Latina de acordo com o Relatório de sustentabilidade 2013 (2013). Vários fatores têm contribuído para isso, com destaque para a alta no setor da construção civil devido principalmente às obras realizadas em todo o país para sediar a Copa do Mundo de 2014 e as Olimpíadas de 2016, bem como obras de melhoria no transporte público, setor de hotelaria, dentre outros.

Diante desse cenário favorável na utilização de produtos de aço no Brasil, o setor de perfis laminados também ganhou destaque, sendo amplamente utilizados principalmente na construção civil como: cantoneiras, usadas como barras de treliças, composição de pilares, reforços de chapas de piso ou vedação, elemento de ligação entre peças; perfil I, empregados em vigas, pilares, estacas de fundação, estacas-prancha; perfil H, usados em pilares, vigas treliçadas; perfil U, utilizados em barras de treliças de grande porte, composição de pilares, terças para apoio de telhas de cobertura, vigas para pequenas cargas e vãos, vigas para apoio de degraus de escada; perfil tubular, usado em barras de treliças planas e espaciais, pilares e vigas, etc. (REBELLO, 2009).

Além da construção civil, o avanço na indústria petrolífera brasileira, principalmente com o Pré-Sal, tem incentivado a aplicação de perfis laminados também nesse setor, na fabricação de tubos de aço rígido (perfil tubular) e flexíveis (perfil Z) para uso em tubulações de extração de petróleo.

A laminação de perfis pode ser feita tanto a quente quanto a frio, mas em ambos os casos, a produção necessita do uso de cilindros (rolos) laminadores, os quais exercem forças compressivas sobre o metal, deformando-o plasticamente e fazendo com que o mesmo atinja a forma final desejada.

Antigamente, tais cilindros eram feitos de ferro fundido coquilhado, mas atualmente, com o uso de máquinas mais modernas e a exigência de um melhor acabamento e controle dimensional do laminado, o aço ferramenta vem sendo amplamente empregado na construção desses cilindros. No caso de laminação a frio, o aço ferramenta mais comumente utilizado é o aço para trabalho a frio, mas outras opções como o aço rápido também vêm sendo utilizadas. Ainda, visando um melhor desempenho e vida útil dos cilindros de laminação, processos como a metalurgia do pó na fabricação desses aços também vem ganhando destaque.

Devido às condições usualmente severas do processo de laminação como um todo, bem como a necessidade de um rígido controle das múltiplas variáveis do processo, os cilindros de laminação podem apresentar baixa vida útil, decorrente de problemas de desgaste abrasivo, desgaste adesivo, fadiga, deformações plásticas ou lascamentos, o que exige uma seleção cuidadosa de um aço ferramenta com propriedades adequadas assim como um excepcional controle do tratamento térmico e usinagem realizados.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral caracterizar quatro tipos de aço ferramenta para trabalho a frio: VD2, QCM8, Sleipner e VF800, e verificar qual é o mais adequado para aplicação em rolos de laminação a frio de perfis.

1.2.2 Objetivos específicos

Visando atingir o objetivo principal, alguns objetivos específicos foram requeridos, dentre eles:

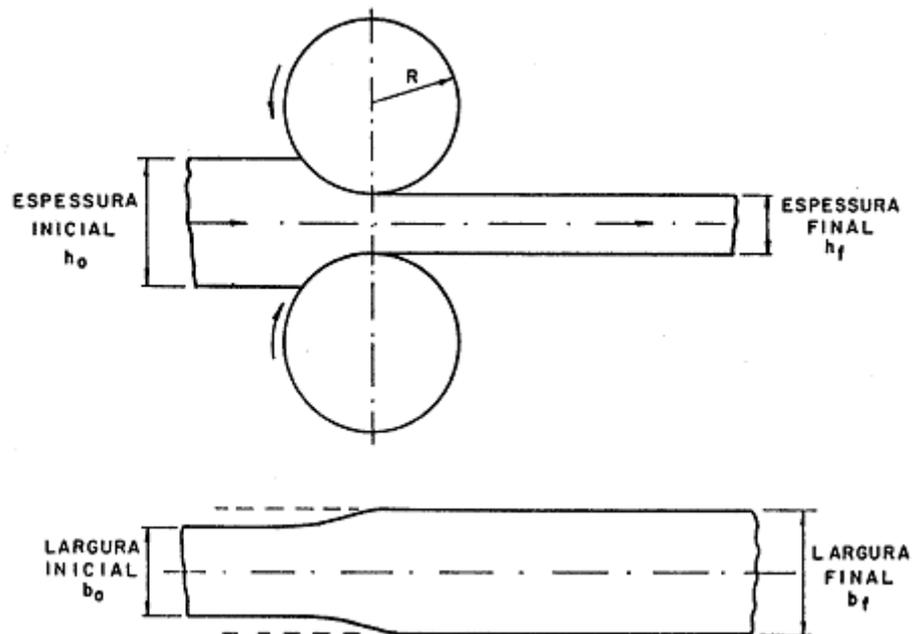
- Fazer um estudo e uma caracterização completa dos aços a serem analisados.
- Analisar a eficiência do tratamento térmico realizado nos aços.
- Analisar o problema de baixa vida útil de rolos de laminação.
- Realizar uma discussão dos resultados obtidos e concluir qual dos aços em questão é o mais indicado para a aplicação, levando em conta sua vida útil.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Laminação

A laminação é definida como a passagem de um metal entre dois cilindros (rolos) que giram em sentidos contrários com a mesma velocidade periférica, causando a deformação plástica do mesmo através da redução da área da sua seção transversal e aumento do seu comprimento (figura 1).

Figura 1 – Ilustração do processo de laminação



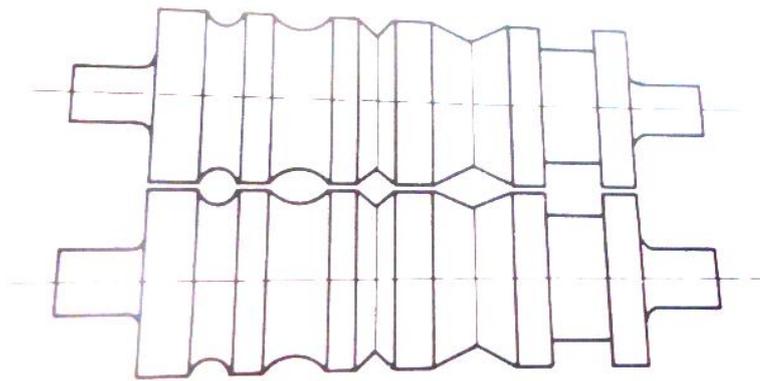
Fonte: FILHO et al., 2011

Esse processo de conformação mecânica é muito usado devido à sua alta produtividade (graças à sua continuidade), ao alto controle dimensional que se pode obter do produto acabado e à variedade de formas possíveis de serem produzidas.

Na laminação, geralmente, passa-se o material mais de uma vez entre os rolos de laminação, uma vez que a redução desejada da seção transversal normalmente não pode ser conseguida em apenas um passe. Assim, o laminador deve possuir uma sequência de passes, para promover a redução gradual da espessura do metal. Normalmente, nesse processo, o material sofre apenas um pequeno aumento da largura, de maneira que a diminuição da espessura resulta em um aumento do comprimento (DIETER, 1981). Segundo Filho et al. (2011), “a sequência e o número de etapas de laminação dependem das condições iniciais da peça (forma e natureza) e das condições finais especificadas (dimensões, formas, acabamento superficial, propriedades mecânicas e metalúrgicas)”.

Durante a laminação, o metal é submetido a altas tensões compressivas, decorrentes da pressão exercida pelos rolos inferior e superior sobre ele, e a tensões cisalhantes superficiais, as quais são responsáveis pelo ato de puxar o material, resultantes do atrito entre o metal e os rolos. Em um trem de laminação, para que se obtenha a redução da espessura desejada, ou pode-se variar a distância entre os cilindros de trabalho mantendo-se o diâmetro (laminadores reguláveis durante a operação), diminuindo tal distância progressivamente à medida que se aumenta os passes, ou pode-se manter a distância fixa entre os cilindros (laminadores fixos durante a operação) e variar o seu diâmetro. Nesse último caso, o metal poderá ser deslocado ao longo do rolo para cada passe de laminação (figura 2) ou poderá ser laminado sucessiva e simultaneamente ao longo do laminador ou trem contínuo (usado para produção em larga escala).

Figura 2 – Cilindros de um laminador fixo durante a operação com variação de perfil ao longo do comprimento



Fonte: HELMAN e CETLIN, 1993

O processo de laminação pode ser conduzido a frio ou a quente, dependendo das dimensões e da estrutura do material da peça especificada para o início e final do processamento (FILHO et al., 2011). Quando o processo de laminação é realizado em temperatura relativamente alta, geralmente superior à temperatura de recristalização do material, o processo é conhecido como laminação a quente. Se for à temperatura ambiente (abaixo da temperatura de recristalização), é conhecido como laminação a frio.

2.1.1 Laminação a frio

Segundo Dieter (1981), a laminação a frio é usada para produzir folhas e tiras com acabamento superficial e com tolerâncias dimensionais superiores comparadas com as tiras produzidas por laminação a quente. Além disso, pode-se observar uma maior resistência mecânica do produto laminado a frio, devido ao encruamento resultante da redução a frio, e

uma microestrutura mais refinada. Outras vantagens obtidas na laminação a frio são: excelente precisão e qualidade superficial e produção econômica de produtos de pequenas espessuras (SILVA; MEI, 2010).

A laminação a frio é uma etapa de conformação que normalmente sucede a laminação a quente. Assim, o material de partida para a produção de produtos laminados a frio são as bobinas de folhas ou tiras, que após passarem pela laminação a quente, são desenroladas, decapadas, secadas, oleadas e bobinadas novamente para a posterior laminação a frio.

Em geral, a laminação a frio é intercalada com tratamentos térmicos de recozimento, que recuperam a ductilidade do material (normalmente por recristalização), que é sensivelmente diminuída pelo encruamento associado à deformação plástica sofrida no processo de conformação mecânica. Para remover a camada de óxido formada sobre a superfície do aço laminado e recozido, em decorrência do aquecimento realizado no recozimento, geralmente o material é mergulhado em tanques contendo soluções ácidas (normalmente usa-se HCl ou H₂SO₄) que dissolvem tal camada de óxido, processo conhecido como decapagem ácida. Outro tipo de decapagem que pode ser realizado é a decapagem mecânica (decalaminação).

A redução da espessura inicial é de 25 a 90% e o acabamento final é obtido na operação de laminação de encruamento, precedida do tratamento superficial de limpeza e do tratamento térmico de recozimento ou normalização, operação essa na qual a redução de espessura é da ordem de 1 a 2% (FILHO et al., 2011). Objetiva-se que o grau de redução em cada cadeira de laminação seja tão uniforme quanto possível pelos diversos passes, sem haver uma queda brusca em relação à redução máxima de cada passe. Geralmente, tem-se uma redução menor no último passe, o qual permite um maior e melhor controle dimensional e acabamento superficial do produto. Por causa disso, os cilindros de laminação do último passe devem ter bom acabamento superficial, possuindo, em geral, menor rugosidade que os do primeiro passe, e permitir que se alcance bitolas dentro da tolerância exigida. Outros métodos usados na melhoria do controle da bitola, geralmente usados em materiais laminados a frio, são o desempenho por tração e o aplainamento por rolos.

Comparando-se a laminação a frio com a laminação a quente, na primeira não ocorre formação de carepas na superfície do laminado, como ocorre na laminação a quente, porém, as pressões e forças motoras usadas para a laminação a frio são muito maiores para a mesma redução de espessura, devido ao encruamento que ocorre nesse tipo de laminação.

2.1.1.1 Laminação não plana (de barras e perfis)

Os produtos obtidos por laminação são classificados em planos e não-planos. Os produtos não-planos, fabricados a partir de blocos, são os perfis estruturais (na forma de I, T, L, C, etc.) e os trilhos (trilhos convencionais, trilhos para pontes rolantes etc.). Os produtos planos, obtidos a partir de tarugos, são as barras (de secção redonda, quadrada, hexagonal etc.), as barras para trefilação (fio-máquina) e os tubos sem costura (FILHO et al., 2011). A figura 3 mostra alguns desses tipos de perfis.

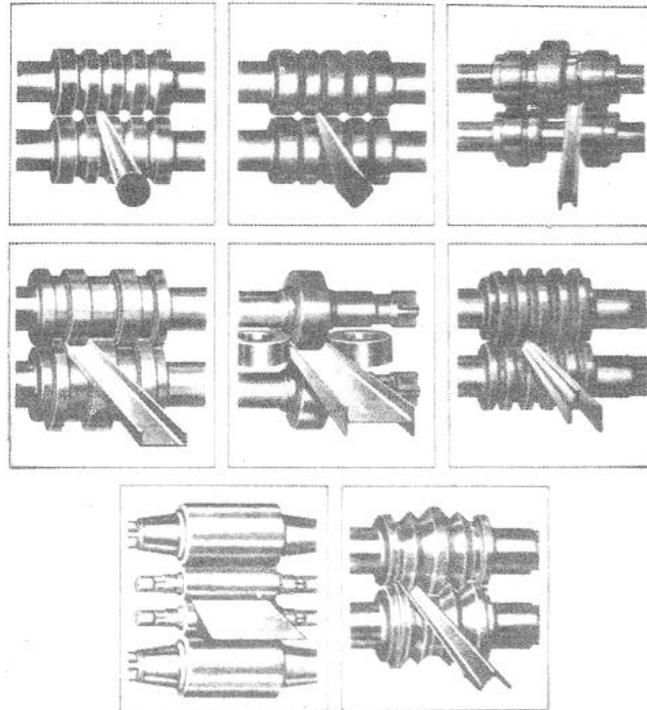
Figura 3 – Alguns tipos de perfis



Fonte: REBELLO, 2009

Dessa forma, os cilindros dos laminados planos são lisos, sendo que normalmente o cilindro inferior não tem movimentos verticais, ao contrário do superior, que deve ser regulado verticalmente para ajustar as condições almejadas na laminação. Já no caso da laminação de não-planos, os rolos são dotados de canais ou ranhuras, as quais se adaptam às sucessivas formas a que a peça em processamento deve ser submetida para atingir a forma final, e em geral, ambos os cilindros inferior e superior são fixos durante a operação (HELMAN; CETLIN, 1993). A figura 4 mostra as variações nos canais dos cilindros de acordo com a forma do material laminado.

Figura 4 – Laminação de barras e perfis



Fonte: DIETER, 1981

Ao contrário da laminação de planos, na laminação de barras e perfis a seção transversal do metal é reduzida em duas direções, sendo que em cada passe o material é comprimido em uma única direção, mas é girado a 90° no passe posterior (DIETER, 1981). O planejamento das forças exercidas pelos cilindros e da bitola alcançada em cada passe na laminação de perfis estruturais é muito mais complicado que quando se trata de produtos planos, o que requer bastante experiência. Segundo Filho et al. (2011), para tal planejamento, vários fatores devem ser considerados como: projeto do laminador, potência disponível, largura e reduções requeridas, condições de lubrificação, resistência do material, estabilidade do laminado, acabamento das superfícies do laminado e dos cilindros e diâmetros dos cilindros.

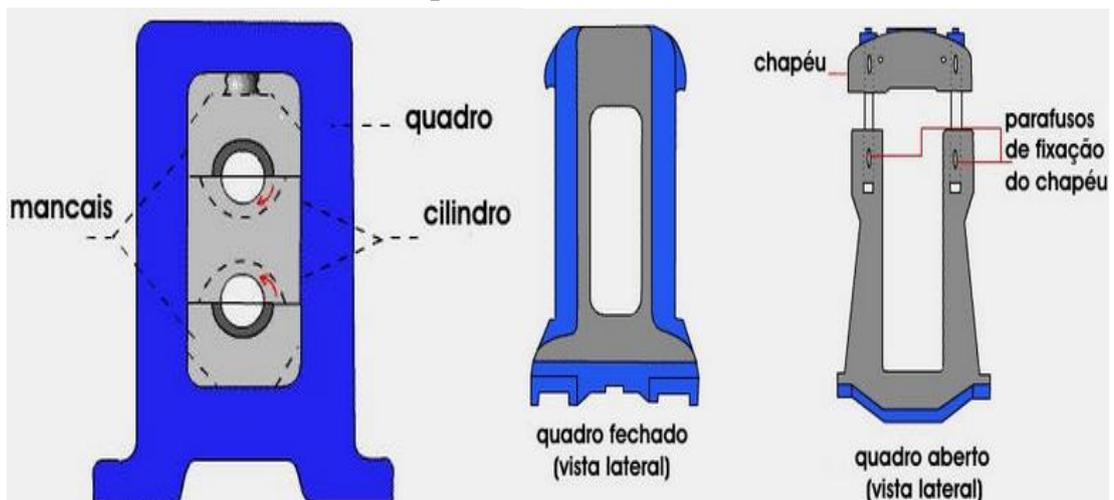
2.1.2 Laminadores

Uma máquina de laminar, laminador, é composta basicamente por rolos de laminação, mancais, nos quais giram os cilindros, uma carcaça chamada gaiola para fixar essas partes, e um motor para fornecer potência aos rolos e controlar a velocidade de rotação (DIETER, 1981).

Segundo Filho et al. (2011), os laminadores são classificados de acordo com o número e arranjo dos cilindros, sendo que os três principais tipos são: laminadores duo, laminadores trio e laminadores quádruo.

O laminador duo é o tipo mais simples e o mais comum, podendo ser reversível ou não. Nos tipos não reversíveis, os rolos possuem mesmo diâmetro e giram em apenas um sentido, fazendo com que o material só possa ser laminado em um sentido. Já nos tipos reversíveis, pode ocorrer a inversão de rotação dos cilindros, o que permite que a laminação ocorra nos dois sentidos de passagem entre os rolos, aumentando assim a velocidade de trabalho e sendo por isso, mais usados atualmente. A figura 5 mostra um desenho esquemático de um laminador duo.

Figura 5 – Típico laminador duo com cilindro regulável durante a operação com vista lateral do quadro aberto e fechado



Fonte: HELMAN e CETLIN, 1993

Os quadros em geral são feitos de aço ou ferro fundido e, como mostrado na figura 4, podem ser do tipo aberto ou fechado. De acordo com HELMAN e CETLIN (1993), o quadro fechado é constituído por uma peça inteira e os cilindros devem ser colocados ou retirados por um movimento paralelo ao seu eixo. A parte superior do quadro aberto é removível e denomina-se chapéu, e os cilindros são removidos por um movimento vertical após a retirada do chapéu. Ainda segundo HELMAN e CETLIN (1993), o quadro fechado é mais resistente que o quadro aberto, porém, promove maior dificuldade para a troca dos rolos.

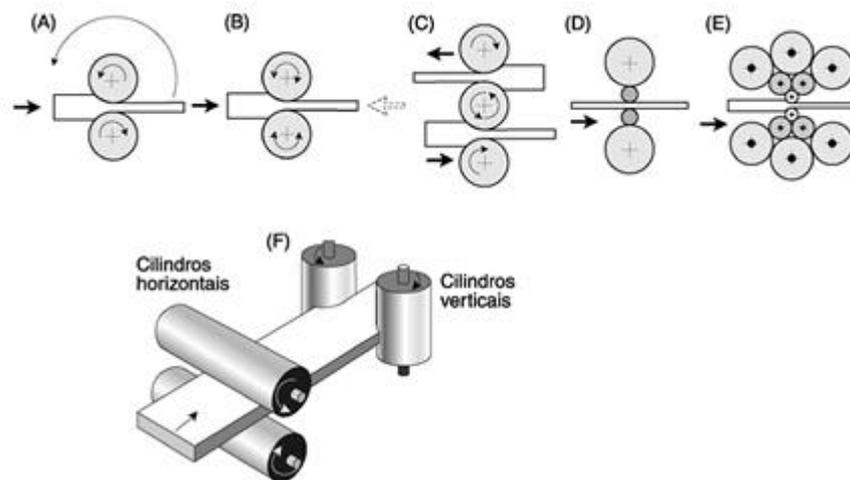
O laminador trio consiste em um rolo superior e um inferior, movidos por um motor e um rolo intermediário de diâmetro menor, que gira por atrito. Nesse caso, a movimentação da peça se dá com a ajuda de uma mesa de levantar ou por uma mesa inclinada (FILHO et al., 2011).

No laminador quádruo são usados geralmente dois cilindros de encosto, maiores que os cilindros de trabalho, podendo ser acionados por motores. Nesse caso, os cilindros de encosto são usados para evitar que os cilindros de trabalho, com diâmetro menor, possam fletir. Normalmente, esses laminadores são dispostos em série, formando linhas de laminação contínua e podem ser usados para trabalho a quente ou a frio (para produtos planos). Quando os rolos de laminação são muito finos, existe a possibilidade de fletirem na direção vertical e horizontal, devendo ser apoiados em ambas as direções, sendo usado nesse caso, o laminador Sendzimir.

Para a laminação de placas que necessitam de bordas também laminadas, usa-se o laminador universal, que é formado por um conjunto de rolos horizontais e outro vertical.

A figura 6 mostra um esquema dos tipos de laminadores citados.

Figura 6 – Tipos de laminadores



A) Laminador duo não reversível; B) Laminador duo reversível; C) Laminador trio; D) Laminador quádruo; E) Laminador Sendzimir; F) Laminador Universal

Fonte: HELMAN e CETLIN, 1993

Em geral, os produtos laminados não planos são produzidos com o uso de laminadores diferentes dos utilizados na laminação plana. A maior parte dos laminadores de barras, por exemplo, podem ser duos ou trios e são equipados com guias, cuja função é conduzir o material para os canais dos rolos de laminação, como também dispõem de repetidores, que invertem a direção da barra, conduzindo-a para o próximo passe. Esses laminadores são conhecidos como laminador de barras ou laminador de perfis comerciais (DIETER, 1981).

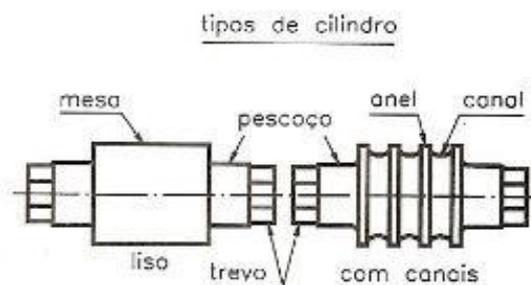
Os laminadores de barras e perfis consistem em várias cadeiras, possuindo cadeira de desbaste, cadeira formadora e cadeira de acabamento, formando o chamado “trem de

laminação”, o qual é composto de vários laminadores situados próximos uns aos outros, lado a lado, sendo que os laminadores em uma cadeia são acionados por uma conexão, que os liga à cadeia adjacente. Na laminação de perfis longos, geralmente, entre as cabeças de laminação existe um dispositivo chamado *dancer*, o qual controla automaticamente a velocidade de giro dos rolos laminadores, aumentando ou diminuindo, de acordo com a tensão imposta pelo laminado. Assim, o *dancer* é o responsável pela manutenção do fluxo de laminado para as cabeças posteriores, fazendo com que não haja acúmulo nem falta de material a ser laminado nos outros passes.

2.1.2.1 Cilindros de laminação

Os cilindros de laminação são a principal parte de um laminador, pois promovem diretamente a conformação da peça atuando como ferramentas de fabricação (FILHO et al., 2011). Eles compõem-se basicamente em três partes: a mesa ou corpo, onde se realiza o processo de laminação da peça, podendo ser lisa (para a laminação de planos) ou com canais (para a laminação de não-planos); o pescoço, onde os mancais são encaixados, devendo ser suportados pelas forças de laminação e pelo peso do próprio cilindro; e os trevos ou garfos de acionamento, onde ocorre o encaixe com o eixo motor por meio de uma manga de engate. A figura 7 mostra as partes de um cilindro liso e um cilindro com canais.

Figura 7 – Partes de um cilindro de laminação



Fonte: BOLTERI, 2013

Segundo Filho et al. (2011), algumas recomendações devem ser observadas durante o projeto dos rolos de laminação, como:

- * A redução por passe deve estar de acordo com o diâmetro dos cilindros, de forma a reduzir as falhas nos mesmos e a potência necessária à redução em cada passe;
- * As passagens devem ter inclinação lateral para se adaptarem ao perfil da peça (este deve ser elaborado com tolerâncias dimensionais estreitas e deve-se considerar a contração decorrente do resfriamento);

- * As seções transversais ao longo da peça devem resultar as mais uniformes possíveis;
- * O desgaste dos cilindros deve ser minimizado, sendo que quanto maior a quantidade de metal laminado por par de cilindros, melhor;
- * As deformações da peça na direção longitudinal e na direção transversal devem ser consideradas;
- * Quanto maiores as velocidades de laminação menor o espalhamento lateral e a intensidade da redução;
- * Quanto maior a temperatura de trabalho, maior a intensidade de redução;
- * Diâmetros maiores de cilindros exigem potências maiores e promovem maior redução da seção transversal;
- * Os cilindros dos passes iniciais, em geral, devem apresentar maior rugosidade para promover uma melhor mordedura do laminado;
- * Deve-se evitar impregnação de impurezas nos rolos, principalmente os das cabeças acabadoras, pois tais impurezas podem marcar o produto laminado, gerando não conformidade no mesmo;
- * Devido às altas temperaturas envolvidas na laminação, deve-se fazer correta refrigeração dos rolos, com emulsões com óleo ou óleo e água, diminuindo a temperatura em serviço dos mesmos e aumentando sua vida útil.

Os cilindros de laminação de produtos não planos devem possuir alta resistência mecânica, uma vez que são submetidos a elevadas pressões, altos choques térmicos, grandes impactos e atritos e elevadas reduções. Tais solicitações podem provocar a formação de fissuras superficiais, que têm possibilidade de se expandirem com os choques mecânicos e provocarem uma posterior fratura dos cilindros (FILHO et al., 2011).

Os cilindros de laminação podem ser fabricados em ferro fundido coquilhado ou não, ou em aço liga fundido ou forjado, dependendo das condições de trabalho a que eles são submetidos. No caso da laminação a frio de perfis, por ser um processo que exige melhor acabamento e controle dimensional, os rolos de laminação são em geral feitos de aços ferramenta, podendo ser um aço para trabalho a frio ou um aço rápido, os quais normalmente passam por um tratamento térmico.

2.2 Aços ferramenta

Ao longo do século XIX, no decorrer da Revolução Industrial, iniciou-se a busca por ferramentas que apresentassem melhor desempenho e maior vida útil, suportando condições severas de uso por um maior período de tempo. No início do século XX, houve então o

desenvolvimento de materiais e aços para ferramentas que atendessem essas características, uma vez que o material empregado muitas vezes é o que define o desempenho e qualidade de uma ferramenta. A partir daí, o uso de ferramentas de aço começou a ter importância e se generalizou, graças aos constantes estudos no campo da técnica de sua fabricação bem como no desenvolvimento de novos tipos de aço com a adição de novos elementos de liga e a variação nos seus teores.

Segundo Silva e Mei (2010), uma definição exata e satisfatória de “aço ferramenta” é praticamente impossível, mas para Rauter (1974), aços ferramenta são “os materiais ferrosos utilizados na confecção do ferramental de que se serve a indústria, para a fabricação manual ou em máquinas ferramentas, de toda sorte de utilidades”. São, entretanto, materiais em que é exigida uma alta qualidade, obtidos geralmente em fornos elétricos por meio de técnicas muito apuradas e sob rigoroso controle de qualidade.

Devido à grande variedade de aços ferramenta existentes hoje em dia, viu-se necessário dividi-los em grupos, como meio de facilitar sua comparação e seleção. Verificou-se que classificar os aços de acordo com sua composição química não é viável, uma vez que as variações de composição química são muito amplas, aliado ao fato de que alguns aços de alta liga podem sofrer grandes mudanças de composição, sem que suas características se alterem muito (SILVA; MEI, 2010). Já uma classificação baseada apenas no emprego do aço, seria aplicável para alguns casos, mas inviável para outros, pois muitas aplicações permitem o uso de diferentes tipos de aço.

Portanto, a classificação mais lógica e prática, obtida pelo consenso entre produtores e usuários de ferramentas, foi a baseada na composição química, características empregadas e tipo de tratamento térmico. Baseado nessa ideia, os aços atualmente podem ser classificados de acordo com as normas DIN (Alemanha), BS (Inglaterra), EN (União Européia) e AISI (Americana).

De acordo com a norma AISI, cada grupo de aço corresponde a uma mesma letra maiúscula designativa, e a distinção entre aços de um mesmo grupo é feita através de números, escritos após a letra representativa do grupo (RAUTER, 1974). Assim, de acordo com a norma AISI, os aços ferramentas são divididos em:

- W – Aços temperáveis em água (*Water*)
- S – Aços resistentes ao choque (*Shock*)
- P – Aços para moldes
- Aços para fins especiais
- L – Tipo baixa liga (*Low alloy*)

F – Tipo carbono-tungstênio

Esses aços podem ser sub-divididos em:

Aços-ferramenta “matriz”;

Aços ao tungstênio para acabamento;

Aços de alto carbono e baixo teor em liga;

Aços semi-rápidos;

Aços grafíticos.

- Aços para trabalho a quente

H1-H19 – Ao cromo

H20-H39 – Ao tungstênio

H40-H59 – Ao molibdênio

- Aços rápidos

T – Ao tungstênio

M – Ao molibdênio

- Aços para trabalho a frio

O – Aços temperáveis em óleo (*Oil*)

A – Aços média liga, temperáveis ao ar (*Air*)

D – Aço alto carbono, alto cromo.

Segundo Chiaverini (2012), as aplicações dos aços ferramentas podem ser divididas em cinco tipos básicos de operação: ferramentas de conformação a quente ou a frio; ferramentas de corte; ferramentas para usinagem; ferramentas para moldes, e aplicações miscelâneas, onde se exige alta resistência ao desgaste ou alta tenacidade.

Para o sucesso do uso dos aços ferramenta nessas aplicações, tais aços devem possuir algumas propriedades gerais como: dureza à temperatura ambiente, resistência ao desgaste, tenacidade suficiente para evitar a quebra da ferramenta, dureza a quente, resistência mecânica, boa temperabilidade, usinabilidade, estabilidade dimensional, etc.

2.2.1 Aços ferramenta para trabalho a frio

Segundo Chiaverini (2012), os aços ferramenta para trabalho a frio também são chamados de indeformáveis, uma vez que são os menos sujeitos a alterações de forma e dimensões durante o tratamento térmico. Tal indeformabilidade é favorecida pelo fato de esses aços serem temperados em óleo ou ar, sendo por isso, indicado para aplicações que exigem alto controle dimensional, como em: corte, conformação (forjamento, estampagem,

laminação, etc) e rebarbação a temperaturas próximas à temperatura ambiente (SILVA; MEI, 2010). Algumas ferramentas feitas com aços para trabalho a frio são: matrizes, brochas, alargadores, punções, rolos de laminação, etc.

De acordo com Silva e Mei (2010), em geral, a melhor microestrutura para se obter um desempenho satisfatório em aços para trabalho a frio é uma combinação de matriz martensítica de alto carbono revenida e uma dispersão uniforme de carbonetos duros e pequenos. O aumento do teor de carbonetos depende tanto da quantidade de carbono como da quantidade de elementos de liga formadores de carbonetos contidos no aço. Já a dispersão uniforme desses carbonetos depende do estágio do processo de fabricação em que eles se formam.

2.2.1.1 Os aços para trabalho a frio e suas principais características

De acordo com a classificação AISI, as principais famílias de aços ferramenta para trabalho a frio são as séries D, O e A.

- **Série D – Alto cromo-alto carbono**

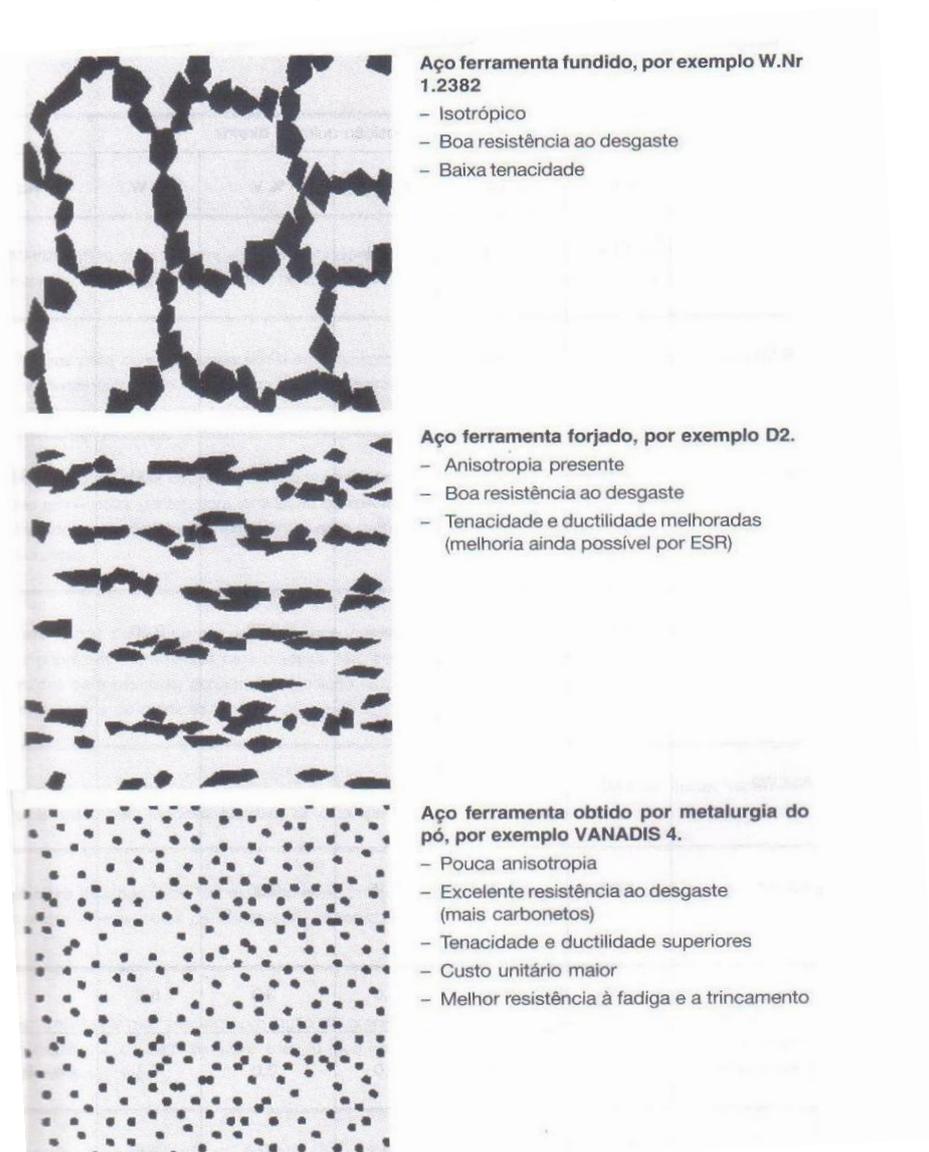
Os aços da série D (*Die steels*) são caracterizados por possuir alto cromo e alto carbono. Esses aços possuem alta resistência ao desgaste devido principalmente à formação de carbonetos duros de cromo e baixa distorção no tratamento térmico, sendo por isso, muito utilizados na fabricação de matrizes. A baixa distorção no tratamento térmico ocorre porque os aços da série D permitem sua têmpera em óleo ou, na maioria dos casos, ao ar, soprado ou parado, o que também favorece uma grande profundidade de endurecimento. Apesar de serem indicados para uso em ferramentas de trabalho a frio, esses aços permitem aquecimento em serviço de cerca de 480°C sem perder suas propriedades (RAUTER, 1974).

O alto teor de cromo torna esses aços mais resistentes à corrosão que os aços com baixo teor de elemento de liga e que os aços ao carbono, o que segundo Chiaverini (2012), resulta na apreciável resistência à tendência dos aços em adquirir manchas quando temperados e polidos. Deve-se atentar ao fato de que o aumento na resistência ao desgaste nesses aços é associado à expressiva redução da resistência ao impacto, sendo essa, menor que a dos aços da série A.

Porém, como os aços da série D têm cerca de 1,5-2,2% C e 12% Cr, eles são extremamente susceptíveis à segregação durante a solidificação dos lingotes, resultando em estruturas de carbonetos pouco favoráveis (SILVA; MEI, 2010). Para melhorar essa condição, deve-se ter alto controle das variáveis de solidificação durante a produção do aço, visando modificar a distribuição dos carbonetos e melhorar as propriedades mecânicas da ferramenta.

A refusão sob escória (ESR) é um processo alternativo que promove uma distribuição mais favorável de carbonetos, devido à solidificação mais controlada, favorecendo o desempenho dos aços feitos sob esse processo em detrimento dos elaborados de forma convencional. Ainda assim, os aços da série D obtidos por fusão ou refusão apresentam carbonetos primários que podem fragilizar os cantos das ferramentas. Uma forma de minimizar esse problema é a metalurgia do pó, processo que vem sendo amplamente usado e que promove uma distribuição mais fina e uniforme dos carbonetos, aumentando a resistência à fadiga. A figura 8 mostra a distribuição esquemática de carbonetos em aços para trabalho a frio em função do tipo de fabricação.

Figura 8 – Distribuição esquemática de carbonetos em aços ferramenta para trabalho a frio em função do tipo de fabricação



Os aços mais comuns da série D são: D2, D3, D4 e D6, sendo que o tipo D2 é o mais empregado mundialmente e o tipo D6 é o mais empregado no Brasil, segundo Silva e Mei (2010).

- **Série O – Temperáveis em óleo**

Os aços dessa série apresentam alto teor de carbono e elementos de liga como tungstênio, manganês, cromo e molibdênio, em quantidade suficiente para garantir a têmpera completa em óleo de peças de médias dimensões (SILVA; MEI, 2010). A têmpera em óleo confere um menor perigo de trincas e modificações dimensionais, o que é um fator imprescindível para ferramentas.

As principais características dos aços dessa série são: pouca deformação na têmpera, alta dureza após a têmpera, alta profundidade de endurecimento e baixa tendência a trincas em seções complexas.

Os principais usos dos aços da série O são: matrizes de cunhagem, moldes para plásticos, matrizes de corte, brochas, fresas, brocas, lâminas de tesoura, trefilas, calibres, machos, e várias outras aplicações que exijam média abrasividade e razoável indeformabilidade na têmpera (RAUTER, 1974). Segundo Chiaverini (2012), o aço O1 é o tipo mais empregado devido à sua razoável temperabilidade para aplicação em ferramentas de dimensões médias, o que se deve ao seu teor de manganês em torno de 1,2%, e à sua baixa tendência de apresentar crescimento de grão, devido a presença de cromo e tungstênio.

- **Série A – Temperáveis ao ar**

Os aços dessa série são caracterizados por conterem teores intermediários de elementos de liga entre os das séries D e O, mas tais quantidades são suficientes para garantir a têmpera completa em seções de até 100 mm de diâmetro quando resfriadas ao ar (ROBERTS, 1998, *apud* SILVA; MEI, 2010, p.369). Em geral, esses aços são temperáveis ao ar, sendo o resfriamento em ar soprado, garantindo baixa deformação.

As características dos aços dessa série são: elevada temperabilidade (devido a presença de elementos como cromo, manganês, molibdênio e em alguns casos, vanádio), resistência ao desgaste intermediária entre os aços das séries D e O, distorção na têmpera de cerca de 25% comparado à da série O, boa tenacidade (podendo ser aumentada ainda mais pela refusão sob escória).

Diante de suas características, em especial pela alta resistência à abrasão (devido ao alto teor de cromo) associada com alta tenacidade, os aços da série A são geralmente empregados em: punções, matrizes de estiramento, matrizes para a compactação de pós metálicos, matrizes de corte, dentre outros tipos de matrizes. O tipo A2 é o mais comumente

empregado. Comparados aos aços da série D, os aços da série A são mais baratos, apresentam aproximadamente o mesmo grau de deformação na têmpera, maior resistência ao impacto e menores temperaturas de tratamento térmico (RAUTER, 1974).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Descrição geral do trabalho desenvolvido

A caracterização realizada no presente trabalho foi conduzida em termos de aspectos superficiais, propriedades mecânicas, composição química e análise microestrutural de quatro cilindros de laminação a frio de perfis fabricados com aços diferentes.

Os cilindros de laminação estudados têm como rota de fabricação as seguintes etapas: compra da matéria prima; pré-usinagem; tratamento térmico e usinagem.

Em relação à primeira etapa, o aço ferramenta foi adquirido no estado recozido na forma de barra de seção transversal circular de 292mm de diâmetro e 80 mm de altura. Ressalta-se que tais dimensões incluem o chamado sobremetal para posterior usinagem.

A pré-usinagem dos cilindros foi realizada por meio de torneamento e furação, possibilitando a confecção de furos e do diâmetro interno, todos para a fixação do cilindro ao laminador.

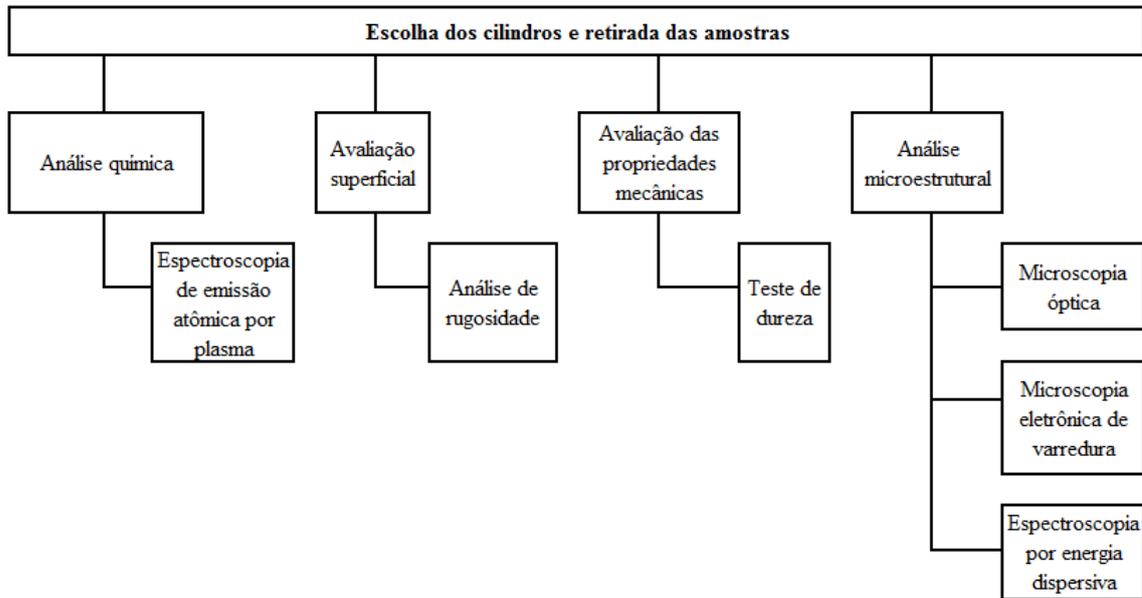
Os tratamentos térmicos, compostos de têmpera e revenimento, foram conduzidos com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas do material e conseqüentemente aumentar a vida útil dos cilindros. Os detalhes dos tratamentos térmicos realizados serão fornecidos no item a seguir, uma vez que alguns parâmetros variaram de acordo com o aço utilizado no cilindro.

Na etapa de usinagem, foram empregados o torneamento, para confecção do perfil final e para acertar as tolerâncias do diâmetro interno, e a retificação, para dar o acabamento necessário à superfície dos cilindros.

Ressalta-se que para a condução deste trabalho, as amostras foram retiradas (por eletroerosão) dos cilindros após o uso, isto é, após ocorrência de falha nos mesmos, inviabilizando sua continuidade no laminador.

Na figura 9 é apresentado um fluxograma com as etapas gerais do trabalho realizado, cujos detalhes serão exibidos em sessões seguintes.

Figura 9 – Fluxograma da caracterização realizada nos aços



Fonte: Próprio autor

3.2 Materiais

No presente trabalho foram caracterizados quatro cilindros de laminação fabricados com diferentes aços ferramenta, os quais serão mencionados ao longo do trabalho de acordo com a designação dada pelo fabricante: aço VD2, aço QCM8, aço Sleipner e aço VF800. Os tratamentos térmicos, a serem discutidos, foram realizados pelo fabricante de cada aço.

3.2.1 Aço VD2

O aço VD2, fabricado pela Villares Metals, corresponde ao aço AISI D2, cujas propriedades, segundo o próprio fabricante, são: alta estabilidade dimensional, alta resistência ao desgaste, especialmente em condições abrasivas, e tenacidade superior aos outros aços da série D (VILLARES METALS, 2014). Ainda de acordo com a folha de dados do fabricante, devido à sua alta resistência ao desgaste, o aço VD2 pode ser utilizado na fabricação de matrizes para estampagem, cunhagem e repuxo, rolos laminadores de roscas, centros para tornos, punções e calibres.

A composição química do aço VD2 é mostrada na tabela 1.

Tabela 1 – Composição química nominal do aço VD2 em % em massa

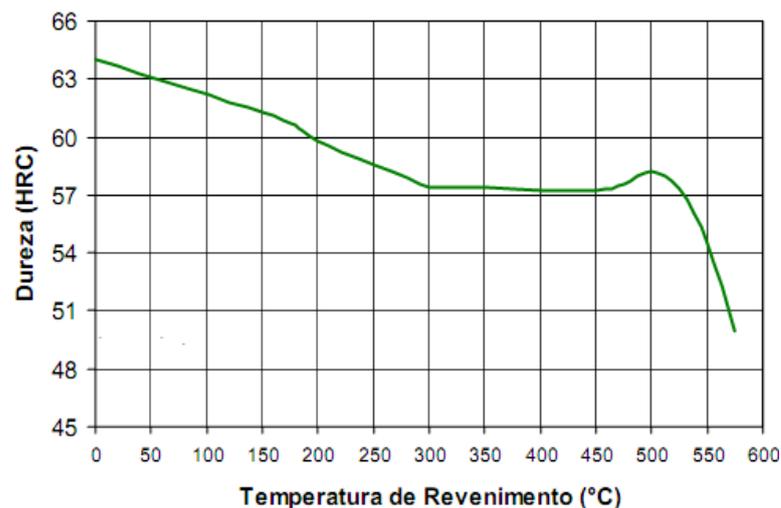
C	Si	Cr	Mo	V
1,50	0,30	12,00	0,95	0,90

Fonte: VILLARES METALS, 2014

Para a aplicação nos cilindros de laminação, o aço VD2 passou pelo tratamento térmico descrito a seguir:

- Pré-aquecimento: O procedimento de pré-aquecimento envolve o aquecimento lento em forno a gás até temperatura de 600°C e um segundo pré-aquecimento até 800°C.
- Têmpera: O aquecimento para a têmpera foi entre 1100 e 1030°C em forno a gás, com tempo de encharque de 30 minutos, seguido de resfriamento em banho de sal fundido mantido entre 500 e 550°C.
- Revenimento: Imediatamente após atingir 60°C foram feitos dois revenimentos, com resfriamento lento até a temperatura ambiente após cada um deles. A temperatura de revenimento foi de 190°C com tempo de encharque de 2 horas. A curva de revenimento desse aço é mostrada na figura 10.

Figura 10 – Curva de revenimento do aço VD2



Fonte: VILLARES METALS, 2014

3.2.2 Aço QCM8

O aço QCM8 é uma patente da Sanyo Steel, portanto, sem similar AISI. De acordo com o fabricante, as características gerais desse aço são: alta tenacidade; alta resistência ao desgaste (maior do que a do aço D2); alta resistência a fadiga sendo maior do que a do aço D2, mesmo com a dureza 2HRC maior e na mesma condição de trabalho, e bom substrato para coberturas superficiais (GRUPO ALLTECH, 2014). É usado em ferramentas como: matrizes e punções para trabalho a frio; laminadores; facas circulares; matrizes e ferramentas cortadas a frio, etc.

Por se tratar de uma patente, o fabricante não fornece informações a respeito da composição química do QCM8, porém, após uma pesquisa, a mesma foi encontrada em um

site de um fornecedor do aço em questão. Essa composição química é mostrada na tabela 2, porém, atenta-se ao fato de não ser totalmente confiável, uma vez que não foi fornecida diretamente pelo fabricante.

Tabela 2– Composição química nominal do aço QCM8 em % em massa

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
1,00	0,95	0,40	7,60	2,00	0,30

Fonte: GRUPO ALLTECH, 2014

Esse aço ferramenta é um aço forjado cujo tratamento térmico pelo qual passou é descrito a seguir:

- Pré-aquecimento: Consistiu em dois estágios, sendo o primeiro com aquecimento lento em forno a gás até a temperatura de 600°C e o segundo com aquecimento até 800°C.
- Têmpera: O aquecimento para a têmpera foi até 1030°C em forno a gás, com tempo de encharque de 30 minutos, seguido de resfriamento em banho de sal fundido a 500°C e depois ao ar forçado.
- Revenimento: Imediatamente após a têmpera foram feitos três revenimentos, com resfriamento lento até a temperatura ambiente após cada um deles. A temperatura dos revenimentos foi de 520°C e o tempo de encharque foi de 2 horas. Não consta a curva de revenimento do aço QCM8 na folha de dados do fabricante.

3.2.3 Aço Sleipner

Sleipner é o nome dado a um aço ferramenta forjado, patenteado pela Uddeholm, cuja composição química é mostrada na tabela 3.

Tabela 3 – Composição química nominal do aço Sleipner em % em massa

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0,90	0,90	0,50	7,80	2,50	0,50

Fonte: UDDEHOLM, 2014

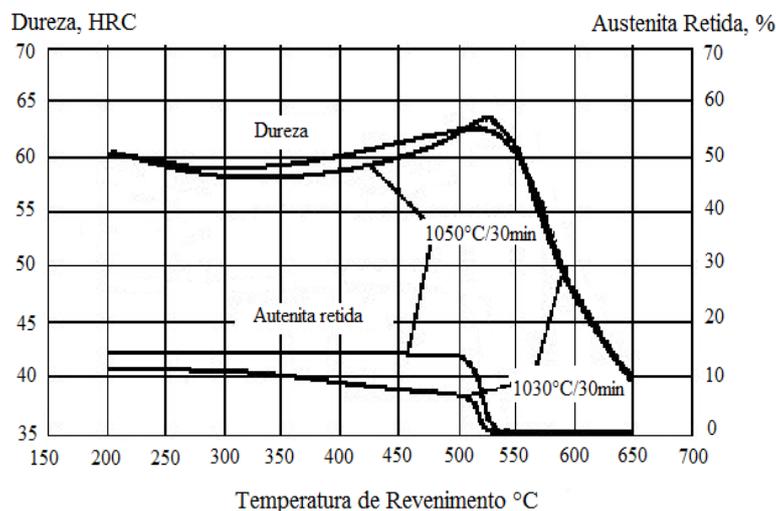
Segundo o informativo técnico do fabricante, o aço Sleipner possui como propriedades: boa resistência ao desgaste misto e ao lascamento; alta resistência a pressão; temperabilidade total e boa estabilidade dimensional na têmpera; alta dureza após revenimento a alta temperatura; boa resistência ao revenimento, usinabilidade e

retificabilidade; boa erosionabilidade e boa propriedade de tratamento superficial (UDDEHOLM, 2014). É recomendado em aplicações como: facas circulares de corte; cunhagem; forjamento a frio; laminador de roscas; repuxo profundo; extrusão a frio; rebarbadores; martelo de esmagamento; rolos conformadores de tubos; cilindro laminador de aro de rodas; facas para picadores de plásticos, dentre outras.

Para a aplicação nos cilindros de laminação, o aço Sleipner foi tratado de acordo com as seguintes etapas:

- Pré-aquecimento: Aquecimento lento em forno a gás até a temperatura de 700°C.
- Têmpera: O aquecimento para a têmpera foi até 1030°C em forno a gás, com tempo de encharque de 30 minutos, seguido de resfriamento em banho de sal fundido a 500°C e depois ao ar forçado.
- Revenimento: Realizado imediatamente após o resfriamento, ainda com a ferramenta a 70°C. Foram feitos dois revenimentos, com resfriamento lento até a temperatura ambiente após cada um deles. A temperatura dos revenimentos foi de 530°C e o tempo de encharque foi de 2 horas. A figura 11 mostra a curva de revenimento.

Figura 11 – Curva de revenimento do aço Sleipner



Fonte: UDDEHOLM, 2014 (adaptado)

3.2.4 Aço VF800

O aço VF800, assim como VD2, também é fabricado pela empresa brasileira Villares Metals, porém não possui similar AISI. Segundo o fabricante, esse aço possui como características gerais: boa resistência ao desgaste associada a elevada tenacidade; elevada temperabilidade, e reduzida susceptibilidade a trincas durante e após a usinagem por eletro erosão em comparação aos aços da série D (VILLARES METALS, 2014). Ainda de acordo

com a folha de dados do fabricante, esse aço pode ser usado em: matrizes e ferramentas para estampagem; prensagem; extrusão; corte; rolos laminadores de rosca; conformação a frio e todas as aplicações de processamento de materiais abaixo de 250°C, especialmente à temperatura ambiente, onde estejam envolvidas elevadas tensões. A composição química do aço VF800 é apresentada na tabela 4.

Tabela 4 – Composição química nominal do aço VF800 em % em massa

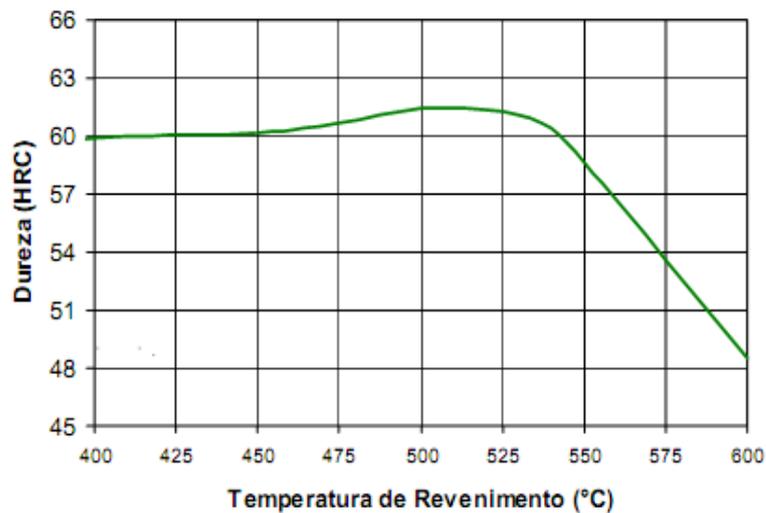
C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0,85	0,90	0,40	8,00	2,00	0,50

Fonte: VILLARES METALS, 2014

O aço VF800 foi tratado de acordo com as etapas abaixo:

- Pré-aquecimento: Aquecimento lento em forno a gás até a temperatura de 600°C.
- Têmpera: O aquecimento para a têmpera foi até 1030°C em forno a gás, com tempo de encharque de 30 minutos, seguido de resfriamento em banho de sal fundido mantido entre 500°C e 550°C.
- Revenimento: Realizado imediatamente após o resfriamento, ainda com o aço a 60°C. Foram feitos dois revenimentos, com resfriamento lento até a temperatura ambiente após cada um deles. A temperatura dos revenimentos foi de 530°C e o tempo de encharque foi de 2 horas. A curva de revenimento é representada na figura 12.

Figura 12 – Curva de revenimento do aço VF800



Fonte: VILLARES METALS, 2014

3.3 Análise química

Análise química quantitativa por espectroscopia de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente foi conduzida com o intuito de confirmar o aço usado nos cilindros e comparar os teores químicos encontrados com os teores fornecidos na folha de dados dos fabricantes.

Para a realização dessa análise, uma amostra de cada aço foi cortada em pequenos pedaços de modo a obter 0,25g. Essa massa foi então diluída em 100 mL de uma solução de 50% de HCl e 50% HNO₃ e comparada com uma solução padrão. O balão volumétrico contendo a solução a ser estudada foi então adicionado ao espectrômetro da marca Varian® modelo 725-ES (para análise).

Após o início do ensaio, uma alíquota da solução foi introduzida sob forma de neblina no centro do plasma de argônio, o qual sobre alta temperatura, promove a excitação dos átomos fazendo com que emitam radiação. Essas radiações, após devida separação de seus comprimentos de onda por sistemas ópticos, têm suas intensidades medidas por meios de detectores de radiação específicos e correlacionadas às concentrações correspondentes através de curvas de calibração obtidas pela medição prévia de Padrões Certificados de Referência.

O mesmo procedimento foi adotado para a análise química de todos os quatro tipos de aços em estudo.

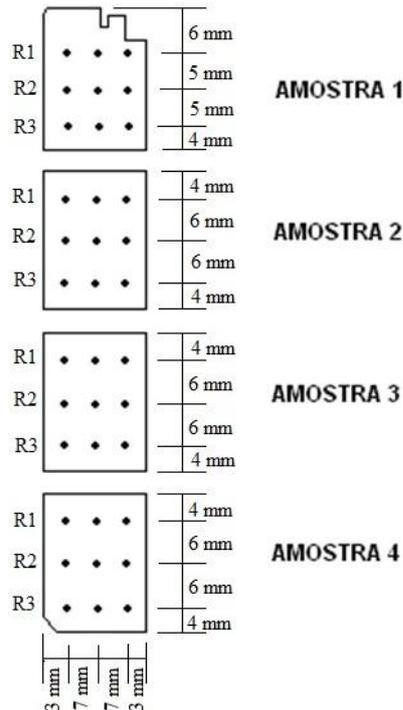
3.4 Avaliação superficial

A avaliação superficial consistiu na medição da rugosidade na superfície de trabalho dos cilindros de laminação. A análise foi conduzida em um cilindro de cada aço estudado, e a rugosidade foi avaliada na região do perfil e no sentido da usinagem do mesmo. Para o procedimento, foi utilizado um rugosímetro da marca Mitutoyo®, modelo SJ-201, com o qual foram feitas quatro medições a cada 90° em cada cilindro, utilizando-se um cut-off de 2,5mm. Os resultados foram obtidos tanto em μin quanto em μm , no parâmetro Ra.

3.5 Avaliação das propriedades mecânicas

Para a avaliação da dureza, as amostras foram marcadas com um pincel atômico nas regiões que seriam mensuradas (total de nove regiões em cada amostra). Essas regiões foram separadas horizontal e verticalmente com o auxílio de uma régua e identificadas por R1, R2 e R3, de acordo com as dimensões mostradas na representação esquemática da figura 13.

Figura 13 – Representação esquemática dos pontos onde as durezas foram medidas



Fonte: Próprio autor

Para a condução dos ensaios, foi utilizada uma pré-carga de 10kgf, uma carga de 150 kgf e um tempo de indentação de 15 segundos. O penetrador usado foi cônico de diamante com um ângulo de 120° e os valores de dureza Rockwell C (HRC) foram obtidos através do relógio comparador do durômetro modelo RM401/A, da marca IGV® (figura 14).

Figura 14 – Durômetro IGV® modelo RM 401/A usado no teste de dureza



Fonte: Próprio autor

Com o intuito de se verificar a temperabilidade de cada material, os resultados obtidos foram mostrados em termos da dureza média dos três pontos separados horizontalmente na mesma região. Desse modo, foram obtidas três durezas médias, uma para cada região (R1, R2 e R3), em cada amostra.

3.6 Análise microestrutural

A microestrutura das amostras foi analisada tanto em termos de microscopia óptica (MO) quanto em termos de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Para a realização dessas análises, cada amostra foi colocada em um molde polimérico da marca Arotec[®] e embutidas a frio com o uso do acrílico Auto-Polimerizante marca JET X15. Como algumas amostras eram quadradas, tomou-se o cuidado de se distinguir as regiões, por meio da adição de um pequeno pedaço de arame abaixo da superfície inferior de cada amostra. Após a cura, as amostras foram lixadas uma a uma em cinco lixas da marca Bosch[®] com granulometrias de #180, #240, #320, #400 e #600 respectivamente, usando-se lixadeiras da marca Struers[®]. Em seguida, cada amostra foi polida em uma politriz modelo DP-9, também da marca Struers[®], em panos com pasta de diamante com granulometria de 9 μ m e 3 μ m, respectivamente. Para o ataque químico foi utilizado o reagente Nital 5% (95% ácido nítrico e 5% álcool etílico).

As análises de microscopia óptica foram conduzidas com o auxílio do microscópio da marca Kontrol[®] e de um computador (figura 15).

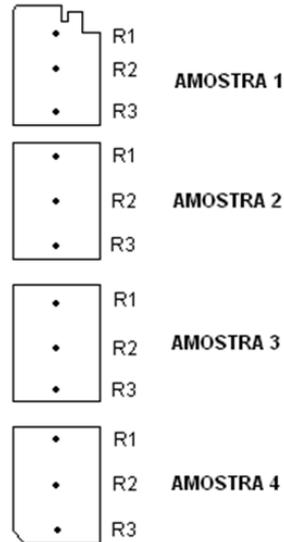
Figura 15 – Equipamentos usados na análise de microscopia óptica



Fonte: Próprio autor

As imagens de MO, com ampliação de 400x, foram feitas em três regiões distintas denominadas R1 (região mais próxima à superfície externa do cilindro), R2 (região central) e R3 (região mais próxima à superfície interna do cilindro), em cada amostra, conforme a representação esquemática da figura 16.

Figura 16 – Representação esquemática das regiões em que foram obtidas as imagens microestruturais

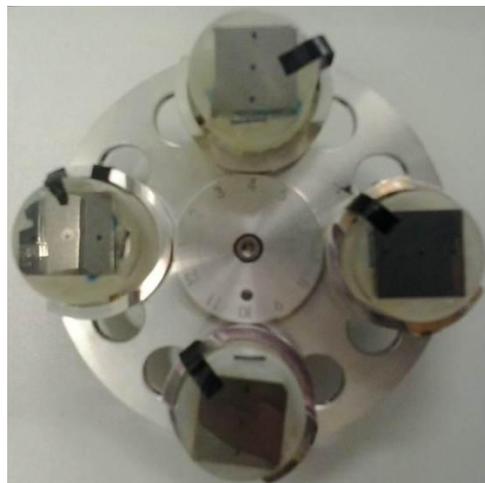


Fonte: Próprio autor

Na análise de MEV, as imagens também foram obtidas e identificadas de acordo com as três regiões mostradas na figura 18.

Para essa análise, os quatro embutimentos de cada aço foram colocados em um porta-amostras, de acordo a seguinte sequência: amostra 1 no número 1, amostra 2 no número 4, amostra 3 no número 7 e amostra 4 no número 10, conforme a figura 17.

Figura 17 – Montagem das amostras no porta-amostras

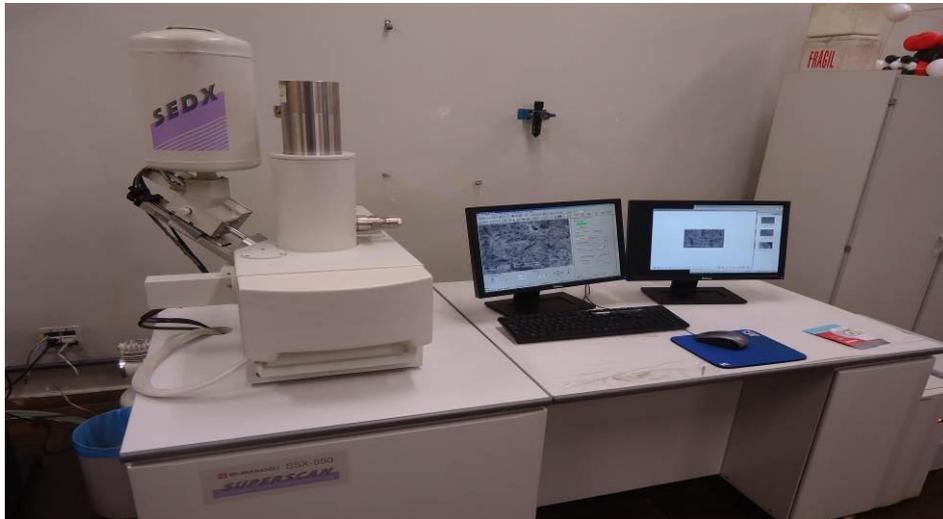


Fonte: Próprio autor

Uma fita dupla face de carbono foi colocada ligando-se a amostra e o porta-amostras a fim de promover a condução de elétrons. Para a correta identificação das regiões que seriam analisadas, as regiões R1, R2 e R3 foram marcadas com um pincel atômico e os embutimentos foram fixados de modo que a marcação do lado inferior (pequeno pedaço de arame) ficasse voltada para o interior do porta-amostras, conforme pode-se observar na figura 19.

Para a realização dessa análise foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura da marca Shimadzu®, modelo SSX 550 Superscan e um computador (figura 18).

Figura 18 – Equipamentos usados nas análises de microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia por energia dispersiva



Fonte: Próprio autor

Todas as imagens foram produzidas por feixe de elétrons secundários, com ampliação de 2000x e 4000x em cada região. Os demais parâmetros utilizados foram: Probe 4.0, WD 17, e AccV 15 kV, os quais foram mantidos constantes para todas as amostras.

Nas análises de espectroscopia por energia dispersiva (EDS), realizada juntamente com a microscopia eletrônica de varredura, foram utilizados os seguintes parâmetros: corrente de 1 nA, tensão de 15kV, ângulo de varredura de 35° e distância de trabalho variando entre 17mm e 21mm. Em cada amostra, três pontos foram analisados: matriz, carboneto maior e carboneto menor, todas referentes à região central da amostra, isto é, à região R2.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise química

Os resultados das análises químicas realizadas por meio da Espectroscopia de Emissão Atômica por Plasma para os aços VD2, QCM8, Sleipner e VF800 são apresentados nas tabelas 5, 6, 7 e 8, respectivamente.

Tabela 5 – Resultado da análise química do aço VD2 em % em massa

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Cu	Ni	Ti
1,470	0,406	0,294	6,380	0,520	0,258	0,044	0,156	0,002

Fonte: Próprio autor

Tabela 6 – Resultado da análise química do aço QCM8 em % em massa

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Cu	Ni	Ti
0,736	0,591	0,362	6,770	1,230	0,334	0,071	0,094	0,002

Fonte: Próprio autor

Tabela 7 – Resultado da análise química do aço Sleipner em % em massa

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Cu	Ni	Ti	Al
0,981	0,845	0,470	6,080	2,190	0,187	0,083	0,111	0,002	0,059

Fonte: Próprio autor

Tabela 8 – Resultado da análise química do aço VF800 em % em massa

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Cu	Ni	Ti	Al
0,853	0,876	0,423	6,810	1,980	0,239	0,123	0,471	0,002	0,050

Fonte: Próprio autor

Em comparação com a tabela 1, observa-se que a análise química do aço VD2 detectou elementos que não constavam na folha de dados desse material, como manganês, cobre, níquel e titânio. Alguns teores diferiram expressivamente dos especificados pelo fabricante, com 47% a menos no teor de cromo, 45% a menos no teor de molibdênio, 35% a mais no teor de silício e 71% a menos no teor de vanádio nos resultados da análise química.

O resultado da análise química do aço QCM8 também apresentou algumas inconsistências em relação aos teores obtidos na internet (tabela 2), como: 35% a menos no teor de carbono, 38% a menos no teor de silício, 11% a menos no teor de cromo, 39% a menos no teor de vanádio, bem como a presença de cobre, níquel e titânio.

Em relação ao aço Sleipner, observa-se que a análise química revelou 9% a mais no teor de carbono, 22% a menos no teor de cromo, 12% a menos no teor de molibdênio, 6% a menos no teor de silício, 63% a menos no teor de vanádio e a presença de baixos teores de cobre, alumínio, níquel e titânio, quando comparado à tabela 3.

A análise química do aço VF800, dentre todos os demais, foi a que apresentou maior proximidade com a folha do fabricante (tabela 4). Observa-se que nessa análise, foi constatado apenas 15% a menos no teor de cromo, 52% a menos no teor de vanádio e, assim como no aço Sleipner, a presença de pequenos teores de cobre, alumínio, níquel e titânio, ausentes na especificação do material.

Em relação aos resultados como um todo, durante a preparação da solução para a análise química, foi observado que nenhum dos aços foi dissolvido completamente, restando maior nível de resíduos não dissolvidos no aço VD2, o que poderia justificar a sua maior discrepância em relação à folha de dados comparado aos demais. Contudo, não se pode afirmar com propriedade essa influência, uma vez que a análise química desse aço foi conduzida três vezes, porém, embora em todas tenha sido observado resíduos, os teores encontrados nas três vezes foram próximos.

Devido à maior variação dos teores de cromo e vanádio em todos os aços analisados, pode-se inferir que ou os fabricantes não estão seguindo os teores divulgados ou que havia maior quantidade desses elementos nos resíduos não dissolvidos, impossibilitando sua correta detecção, o que é o mais provável de ter ocorrido. Segundo Gervasio (2000), “a complexidade do processo de dissolução convencional de aço ferramenta deve-se ao alto teor de metais refratários”.

Uma melhor dissolução dos aços, e conseqüentemente um melhor resultado, poderia ser alcançado mudando-se os solventes. Gervasio (2000), obteve bons resultados solubilizando-se 0,1 g de limalhas de aço ferramenta com 10,0 mL de mistura sulfofosfórica (60% água, 20% H_3PO_4 e 20 % H_2SO_4), seguido de pré-aquecimento e posterior adição de 10 mL de HNO_3 . A dissolução eletrolítica, ao invés da dissolução convencional também poderia gerar melhores resultados.

Além do problema da dissolução incompleta, a variação dos teores químicos encontrados entre a análise química do aço QCM8 e a composição padrão obtida da internet (tabela 2), não pode ser relevada uma vez que como dito na seção anterior, os valores não foram obtidos da folha de dados do fabricante. Sendo assim, os teores fornecidos pela empresa chinesa Dongguan Holiness Bao Steel Mold Co. Ltd, de onde foram retirados os dados da tabela 2, podem diferir dos teores usados pelo próprio fabricante de aço QCM8 (Sanyo Steel), servindo apenas como uma mera referência.

Vale ressaltar também que não se sabe a faixa de trabalho dos fabricantes, isto é, os teores mínimos e máximos permitidos a cada elemento, o que mostra que mesmo para grandes

diferenças constatadas nos teores obtidos e fornecidos, pode ser que ainda assim os teores obtidos estejam dentro da faixa.

Os elementos constatados na análise química e não verificados nas folhas de dados, possuíam em geral, teores menores do que 0,1%, considerados muitas vezes desprezíveis e, por isso, não sendo comumente divulgados.

4.2 Análise de rugosidade

Nas tabelas 9 e 10 são apresentados os resultados obtidos nas análises de rugosidade em μin e μm , respectivamente, conduzidas diretamente no perfil dos cilindros de laminação após o uso.

Tabela 9 – Resultado da rugosidade medida em μin

Material do cilindro	Rugosidade 1 (μin)	Rugosidade 2 (μin)	Rugosidade 3 (μin)	Rugosidade 4 (μin)	Rugosidade Média (μin)	Desvio padrão
VD2	15,80	16,20	15,10	17,20	16,08	0,88
QCM8	15,90	19,50	22,00	13,30	17,68	3,84
Sleipner	15,00	15,00	17,20	13,10	15,08	1,68
VF800	20,80	18,70	19,50	18,30	19,33	1,10

Fonte: Próprio autor

Tabela 10 – Resultado da rugosidade medida em μm

Material do cilindro	Rugosidade 1 (μm)	Rugosidade 2 (μm)	Rugosidade 3 (μm)	Rugosidade 4 (μm)	Rugosidade Média (μm)	Desvio padrão
VD2	0,40	0,42	0,38	0,44	0,41	0,03
QCM8	0,40	0,50	0,56	0,34	0,45	0,10
Sleipner	0,38	0,38	0,44	0,33	0,38	0,05
VF800	0,53	0,48	0,50	0,47	0,50	0,03

Fonte: Próprio autor

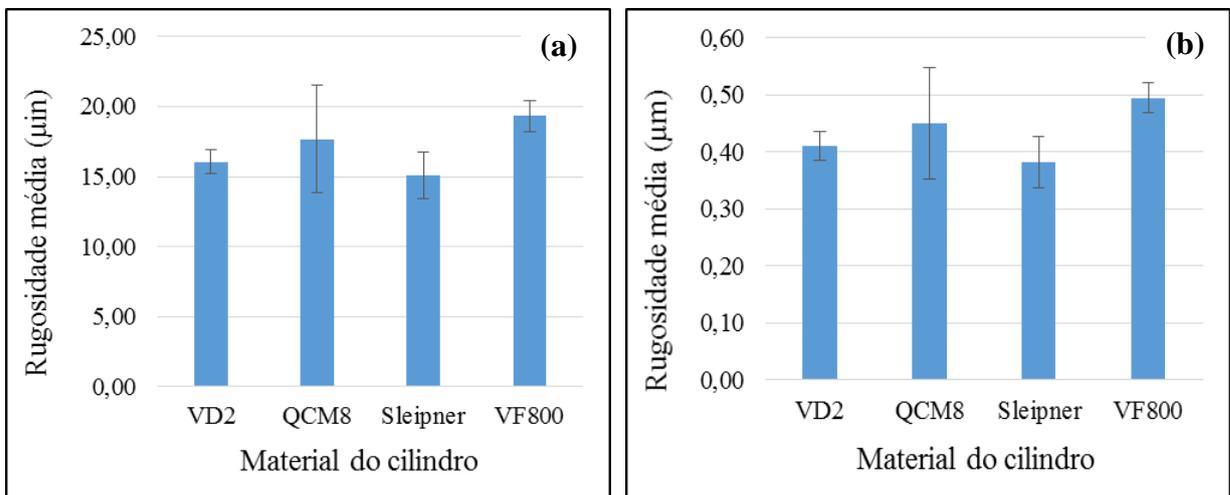
Constata-se que tendo em vista o desvio padrão, as rugosidades médias de todos os cilindros foram relativamente parecidas. Isso significa que todos os cilindros foram desgastados similarmente durante a laminação (sugerindo que a dureza de todos seja também semelhante).

Ressalta-se que os processos de usinagem e acabamento final foram os mesmos para todos aços, assumindo assim que a condição inicial de rugosidade dos cilindros antes do uso era a mesma: 12,6 μin ou 0,32 μm , conforme a especificação de fabricação. Como a rugosidade superficial após o uso aumentou, pode ser que o carregamento cíclico tenha induzido a movimentação de defeitos internos nos materiais.

Segundo Moraes e Júnior (2013), “mesmo que um metal tenha uma superfície polida, a movimentação de defeitos internos causa o surgimento de rugosidades após um determinado número de ciclos em fadiga”. Tais rugosidades atuam como pontos de concentração de tensão, podendo por isso, evoluir para trincas após certo número de ciclos. Seguindo o mesmo raciocínio, Smith e Hashemi (2012) afirmam que a rugosidade superficial é um dos principais fatores que afetam a resistência a fadiga de um metal, sendo que de um modo geral, quanto mais lisa for a superfície da amostra metálica, maior será a resistência à fadiga.

Diante disso, baseando-se apenas na rugosidade média, pode-se dizer que o aço Sleipner, é o que tem menor probabilidade de falhar por fadiga, pois apresentou menor rugosidade média, dentre os demais (menos concentradores de tensão e conseqüentemente maior resistência à fadiga). Isso pode ter ocorrido ou pelo fato desse aço ter desgastado menos do que os outros ou por ter tido menor movimentação de defeitos durante o processo de laminação. Em contrapartida, o aço VF800 é o mais susceptível a falhar por fadiga, conforme mostra sua maior rugosidade média na figura 21.

Figura 21 – Comparação da rugosidade média obtida para cada cilindro



Rugosidade média obtida em (a) µm; (b) µm

Fonte: Próprio autor

4.3 Análise de dureza

Os resultados das medições de dureza dos aços VD2, QCM8, Sleipner e VF800 são apresentados nas tabelas 11, 12, 13 e 14, respectivamente.

Tabela 11 –Resultado das medições de dureza –Aço VD2

	Região	1a medição (HRC)	2a medição (HRC)	3a medição (HRC)	Média (HRC)	Desvio Padrão
Amostra 1	R1	56	55	56	55,7	0,6
	R2	57	53	56	55,3	2,1
	R3	55	58	61	58,0	3,0
Amostra 2	R1	55	56	55	55,3	0,6
	R2	62	57	59	59,3	2,5
	R3	58	56	56	56,7	1,2
Amostra 3	R1	54	57	57	56,0	1,7
	R2	58	55	58	57,0	1,7
	R3	56	58	56	56,7	1,2
Amostra 4	R1	56	57	56	56,3	0,6
	R2	58	56	60	58,0	2,0
	R3	58	55	57	56,7	1,5

Fonte: Próprio autor

Tabela 12 –Resultado das medições de dureza –Aço QCM8

	Região	1a medição (HRC)	2a medição (HRC)	3a medição (HRC)	Média (HRC)	Desvio Padrão
Amostra 1	R1	63	60	57	60,0	3,0
	R2	62	60	59	60,3	1,5
	R3	56	57	59	57,3	1,5
Amostra 2	R1	58	57	58	57,7	0,6
	R2	61	59	60	60,0	1,0
	R3	58	58	57	57,7	0,6
Amostra 3	R1	58	59	59	58,7	0,6
	R2	58	59	58	58,3	0,6
	R3	56	60	59	58,3	2,1
Amostra 4	R1	56	56	57	56,3	0,6
	R2	60	58	59	59,0	1,0
	R3	58	59	59	58,7	0,6

Fonte: Próprio autor

Tabela 13 –Resultado das medições de dureza –Aço Sleipner

	Região	1a medição (HRC)	2a medição (HRC)	3a medição (HRC)	Média (HRC)	Desvio Padrão
Amostra 1	R1	59	58	59	58,7	0,6
	R2	59	59	59	59,0	0,0
	R3	59	59	58	58,7	0,6
Amostra 2	R1	57	57	58	57,3	0,6
	R2	58	59	58	58,3	0,6
	R3	59	59	58	58,7	0,6
Amostra 3	R1	59	57	58	58,0	1,0
	R2	59	58	58	58,3	0,6
	R3	58	59	58	58,3	0,6
Amostra 4	R1	59	57	57	57,7	1,2
	R2	60	60	59	59,7	0,6
	R3	59	59	55	57,7	2,3

Fonte: Próprio autor

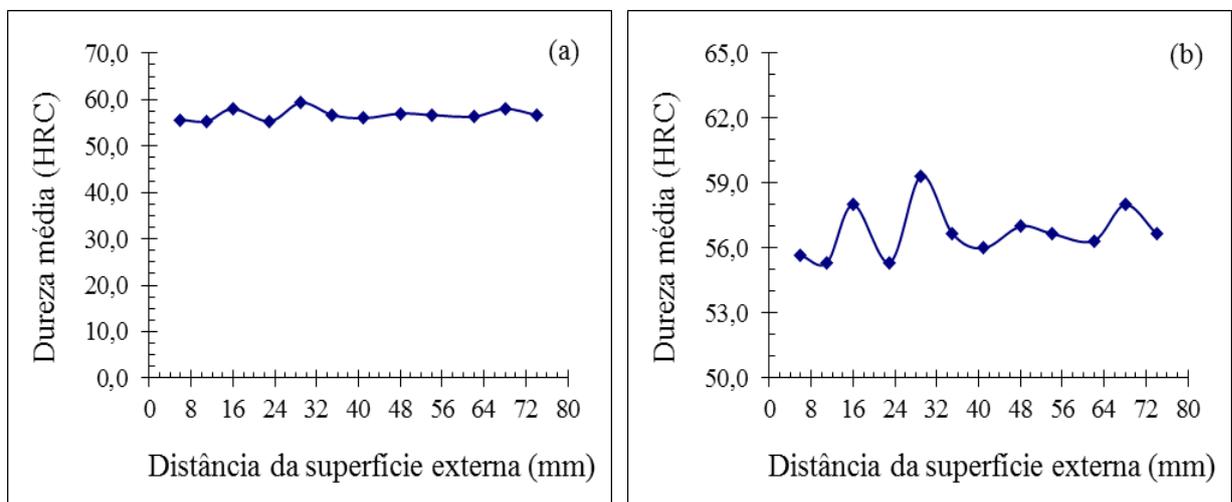
Tabela 14 –Resultado das medições de dureza –Aço VF800

	Região	1a medição (HRC)	2a medição (HRC)	3a medição (HRC)	Média (HRC)	Desvio Padrão
Amostra 1	R1	58	60	58	58,7	1,2
	R2	63	61	62	62,0	1,0
	R3	59	59	59	59,0	0,0
Amostra 2	R1	55	55	55	55,0	0,0
	R2	59	57	57	57,7	1,2
	R3	57	58	57	57,3	0,6
Amostra 3	R1	54	59	58	57,0	2,6
	R2	60	54	53	55,7	3,8
	R3	59	60	60	59,7	0,6
Amostra 4	R1	59	58	56	57,7	1,5
	R2	62	59	57	59,3	2,5
	R3	58	60	62	60,0	2,0

Fonte: Próprio autor

As figuras 22, 23, 24 e 25, mostram os gráficos representativos dos perfis de dureza dos aços VD2, QCM8, Sleipner e VF800, respectivamente. Na figura 26 estão representados os perfis de dureza de todos os aços, como forma de comparação.

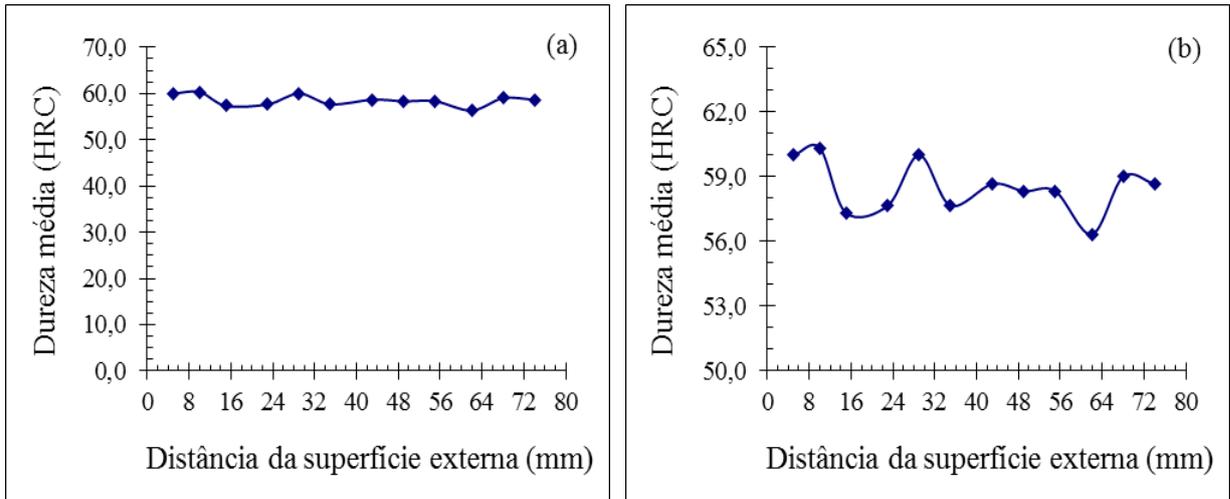
Figura 22 – Perfil de dureza do aço VD2



Dureza média na escala de (a) 0 a 70HRC; (b) 50 a 65HRC

Fonte: Próprio autor

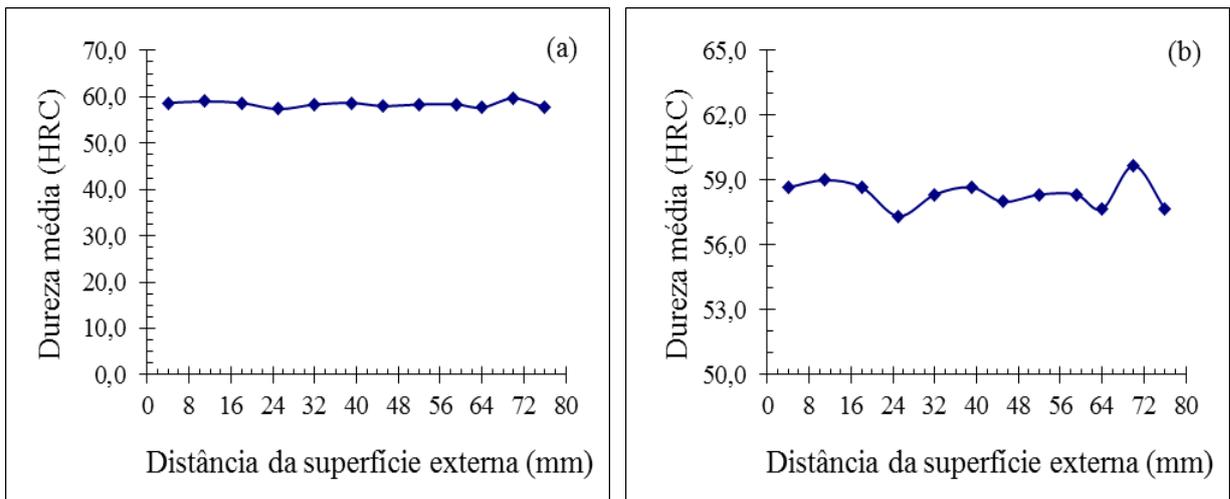
Figura 23 – Perfil de dureza do aço QCM8



Dureza média na escala de (a) 0 a 70HRC; (b) 50 a 65HRC

Fonte: Próprio autor

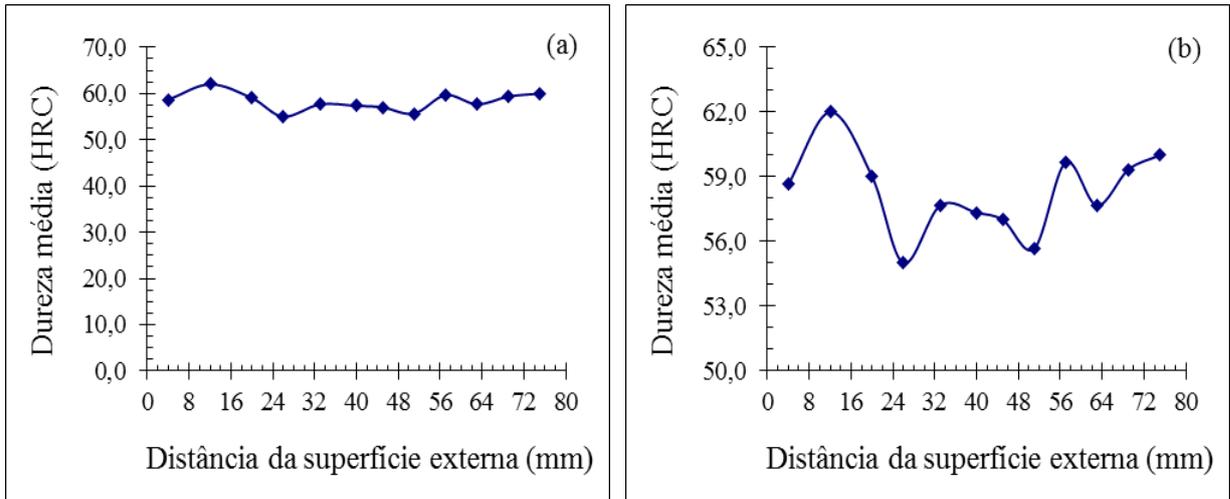
Figura 24 – Perfil de dureza do Sleipner



Dureza média na escala de (a) 0 a 70HRC; (b) 50 a 65HRC

Fonte: Próprio autor

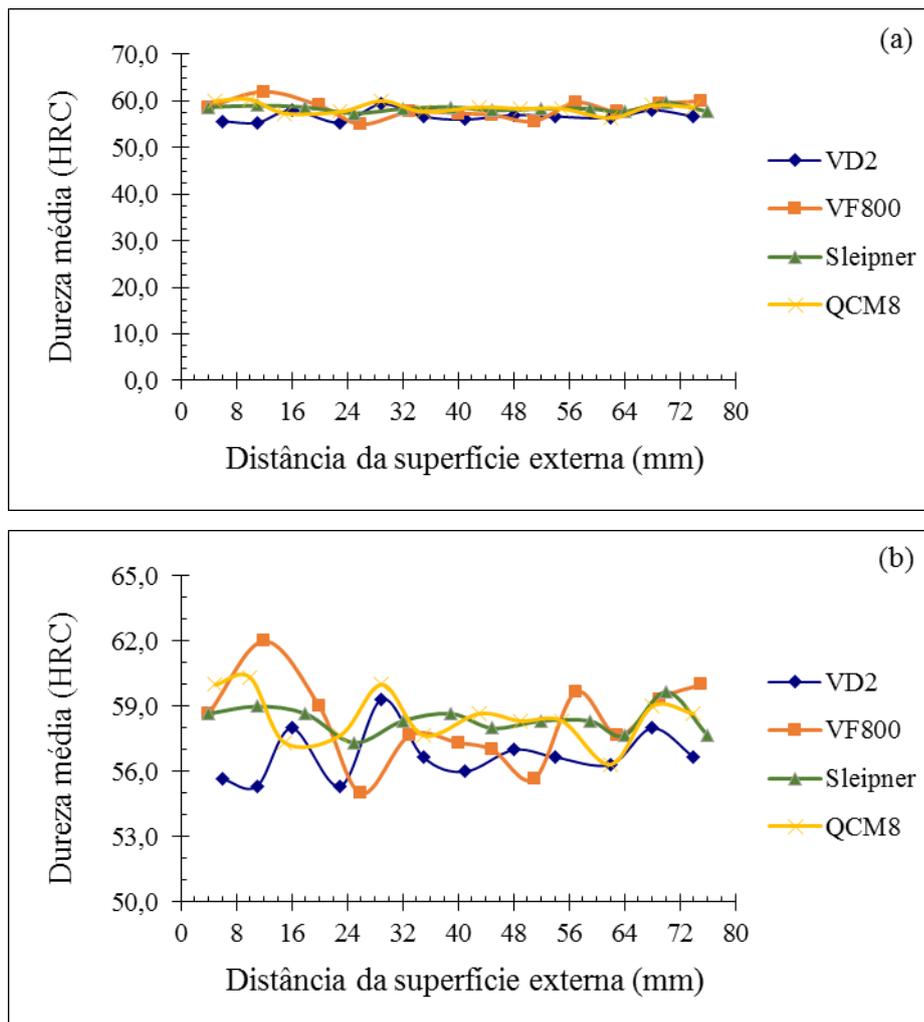
Figura 25 – Perfil de dureza do aço VF800



Dureza média na escala de (a) 0 a 70HRC; (b) 50 a 65HRC

Fonte: Próprio autor

Figura 26 – Comparação do perfil de dureza entre todos os aços analisados



Dureza média na escala de (a) 0 a 70HRC; (b) 50 a 65HRC

Fonte: Próprio autor

De acordo com as análises, não foi observada a diminuição da dureza com o aumento da distância da superfície externa, indicando que de fato a têmpera realizada nos aços foi total. Tal comportamento já era esperado uma vez que todos os aços analisados possuem elementos de liga que aumentam a temperabilidade, como Mn, Mo, Cr, Ni e V (CHIAVERINI, 2012), conforme constatado na análise química (sessão 5.1).

“A dureza do aço ferramenta depende da quantidade, tamanho e distribuição de carbonetos primários, carbonetos secundários, e fases de austenita retida e martensita temperada” (ROBERTS; KRAUSS, 1998, *apud* DAS; DUTTA; RAY, 2010, p. 2191, tradução nossa).

O aço Sleipner foi o que apresentou maior homogeneidade no perfil de durezas, o que sugere que sua microestrutura seja a mais homogênea, com carbonetos mais bem distribuídos. Por outro lado, o aço VF800 foi o que mostrou maior heterogeneidade, com dureza média variando entre 55HRC e 62HRC.

Foi recomendado que todos os aços em questão fossem tratados para atingirem a dureza de 61-62 HRC, porém, os valores obtidos no perfil de durezas, conforme observado, foram, em média, 5% mais baixos. Esse fato se deve a alguma alteração feita no tratamento térmico recomendado aos aços (folha de dados) ou a tolerâncias iminentes do próprio processo de tratamento. Contudo, dada a aplicação em rolos de laminação a frio, acredita-se que uma variação de 5% na dureza não é determinante para alterar significativamente as propriedades mecânicas do material e comprometer a aplicação.

Das et al. (2010) alcançaram uma dureza de 60,9HRC para o aço AISI D2 utilizando uma temperatura de austenitização de 1297K (~1024°C) com tempo de encharque de 30 minutos e revenimento a 483K (~210°C) por 2 horas. De acordo com a curva de revenimento do fabricante do aço VD2 (figura 10), com um revenimento à temperatura 210°C, a dureza atingida por esse aço seria de aproximadamente 59HRC, resultado próximo ao encontrado por Das et al. (2010). Já Bourithis, Papadimitriou e Sideris. (2006) após tratarem o aço AISI D2 com austenitização por 30 min a 1020°C e dois revenimentos de 500°C e 480°C por 2 horas cada, atingiram uma dureza de 60HRC.

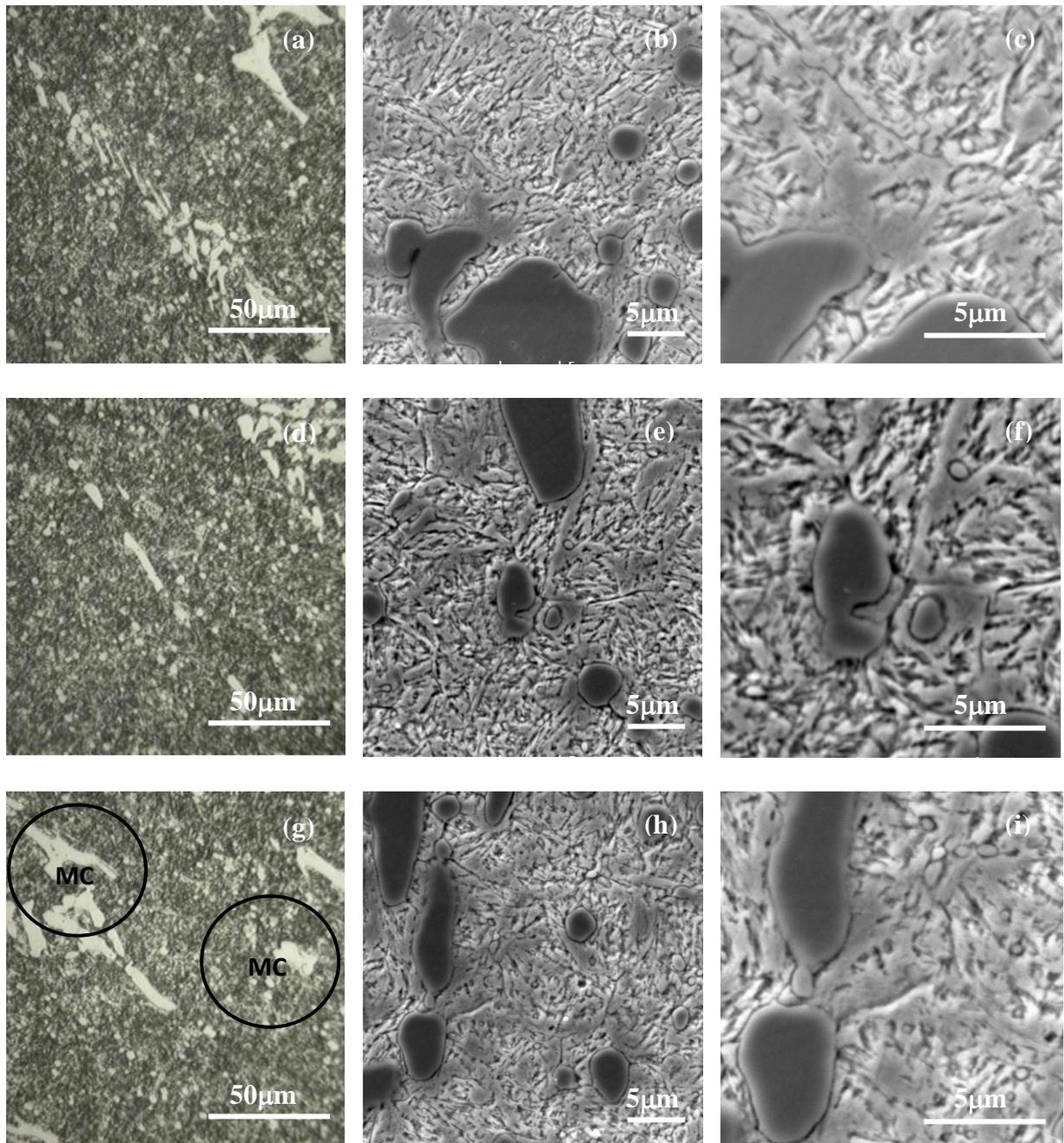
4.4 Análise microestrutural

4.4.1 MO e MEV

O resultado das análises de MO e MEV são mostrados nas figuras 25, 26, 27 e 28 (VD2), figuras 29, 30, 31 e 32 (QCM8), figuras 33, 34, 35 e 36 (Sleipner) e figuras 37, 38, 39 e 40 (VF800). As figuras (a), (d) e (g) tratam-se de imagens de MO e as demais de MEV.

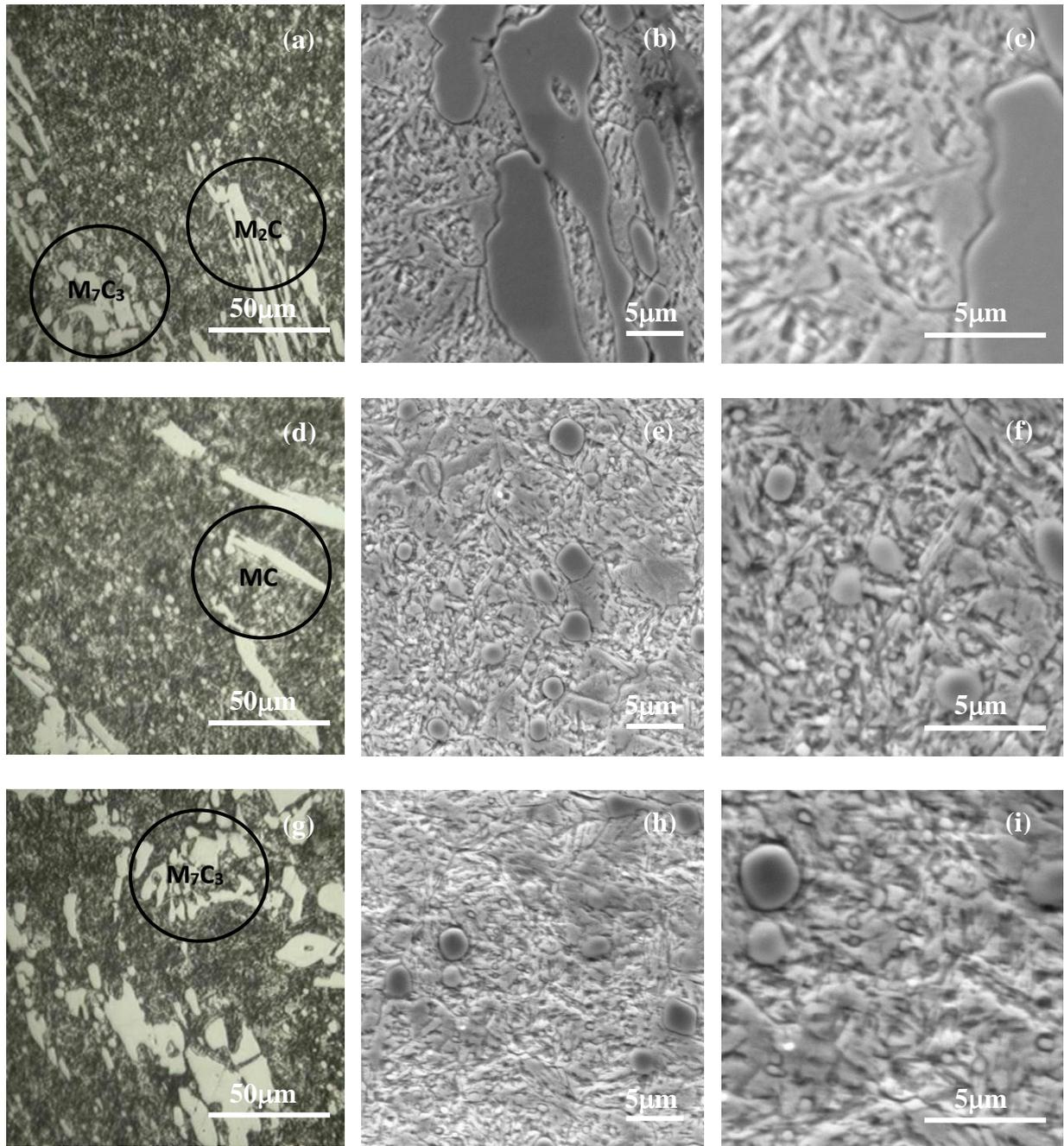
4.4.1.1 Rolo de aço VD2

Figura 25 – Micrografias (MO e MEV) do aço VD2 – Amostra 1 (superfície)



(a), (b) e (c) região R1; (d), (e) e (f) região R2; (g), (h) e (i) região R3

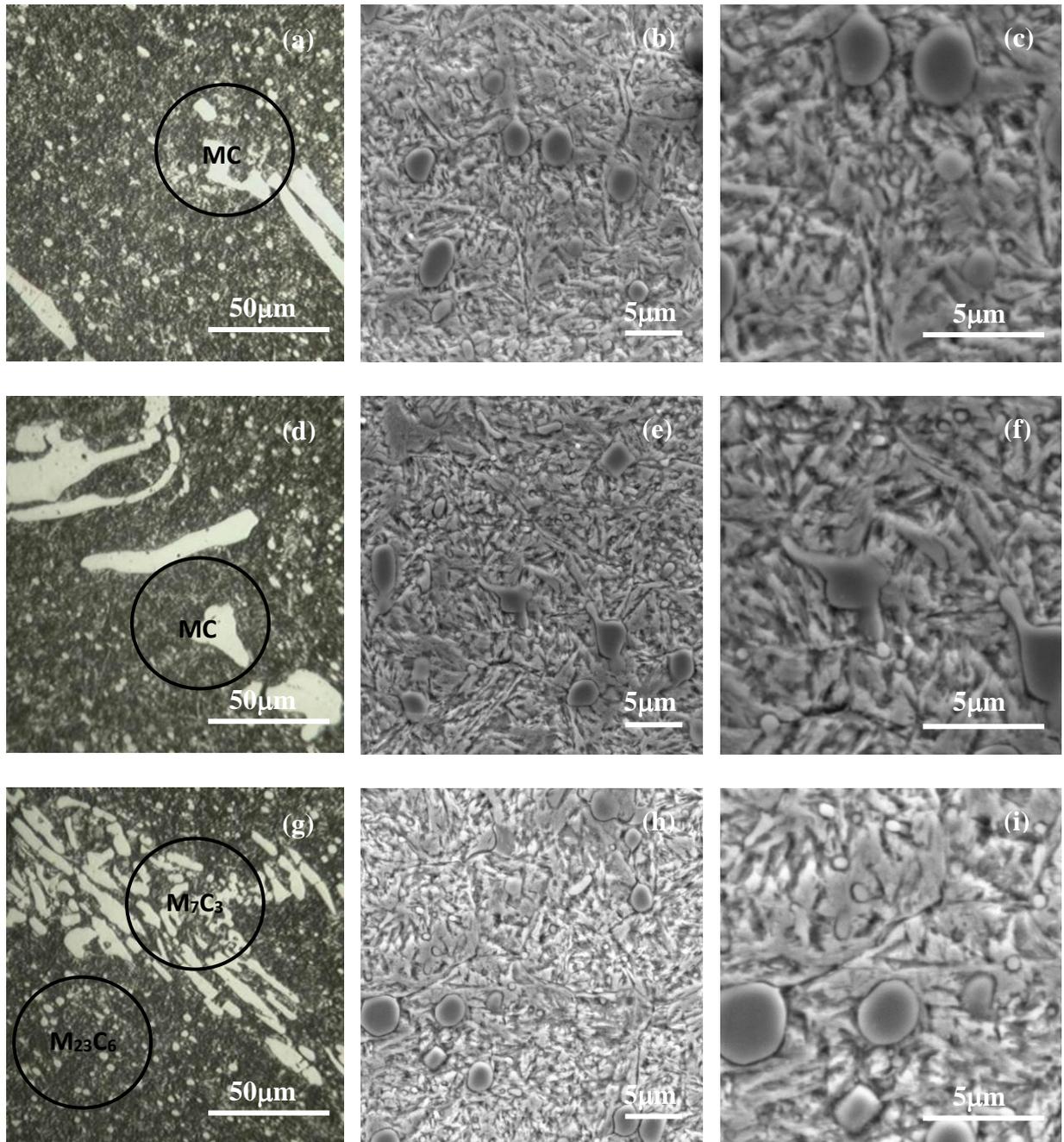
Fonte: Próprio autor

Figura 26 – Micrografias (MO e MEV) do aço VD2 – Amostra 2

(a), (b) e (c) região R1; (d), (e) e (f) região R2; (g), (h) e (i) região R3

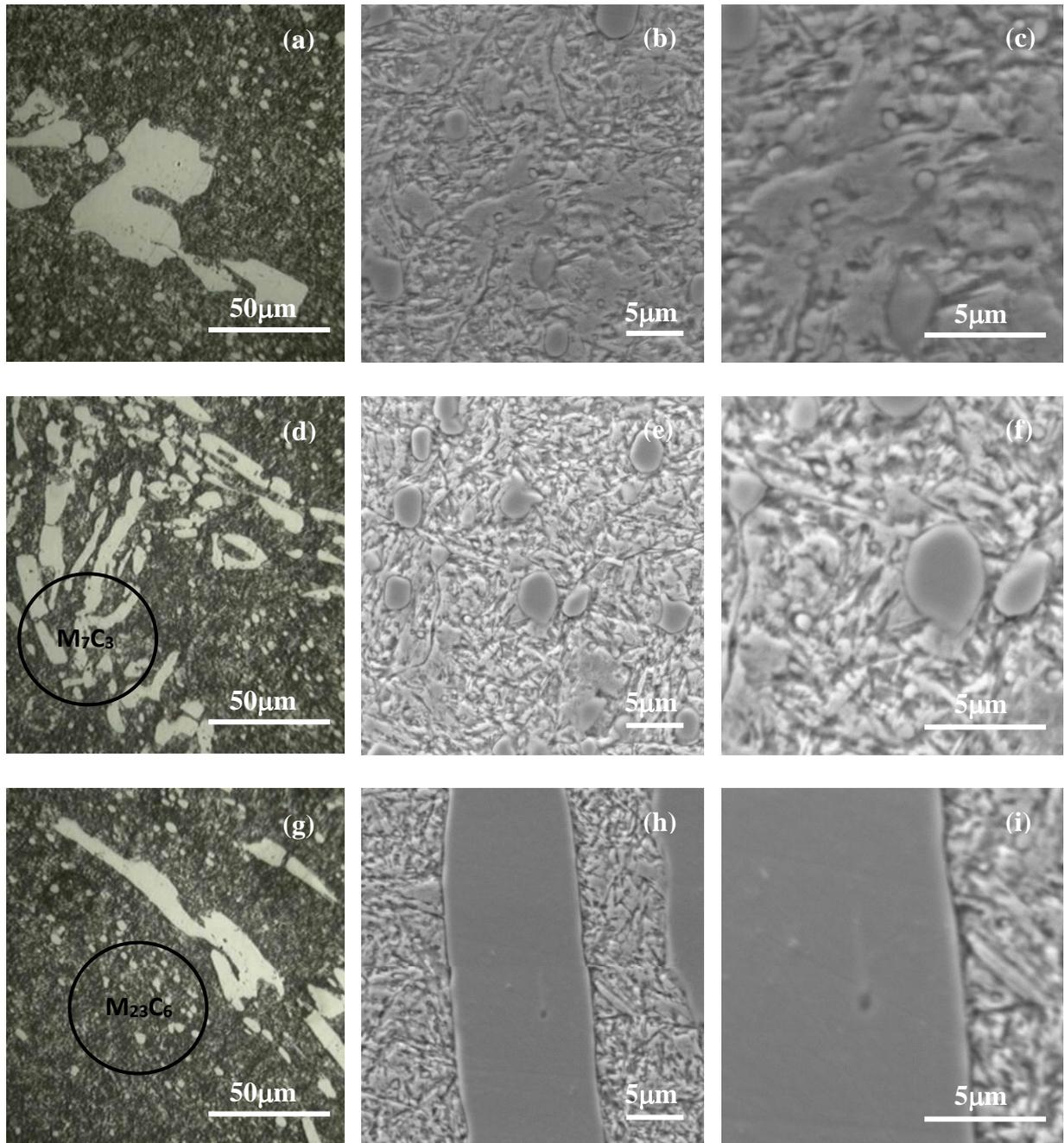
Fonte: Próprio autor

Figura 27 – Micrografias (MO e MEV) do aço VD2 – Amostra 3



(a), (b) e (c) região R1; (d), (e) e (f) região R2; (g), (h) e (i) região R3

Fonte: Próprio autor

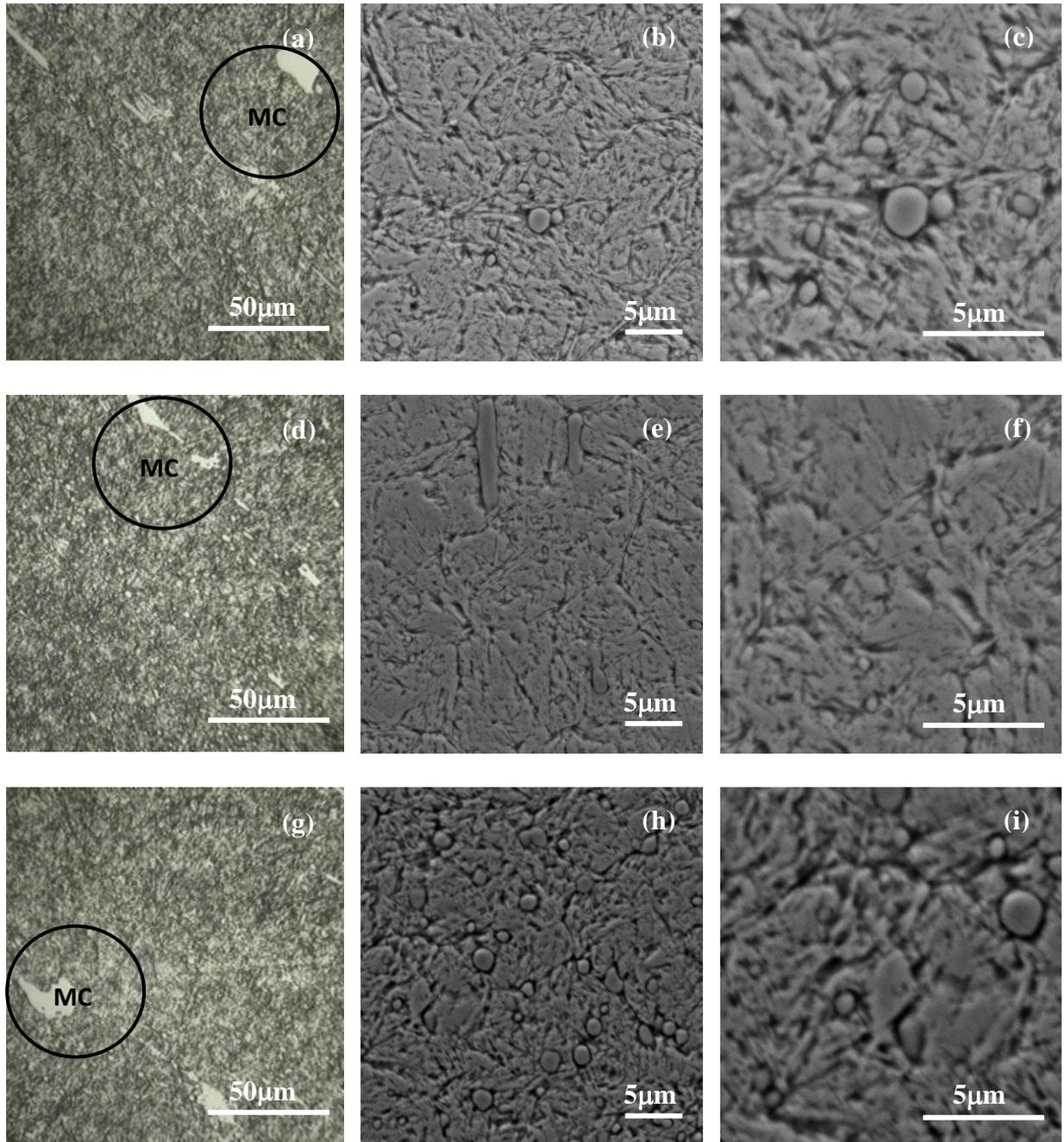
Figura 28 – Micrografias (MO e MEV) do aço VD2 – Amostra 4

(a), (b) e (c) região R1; (d), (e) e (f) região R2; (g), (h) e (i) região R3

Fonte: Próprio autor

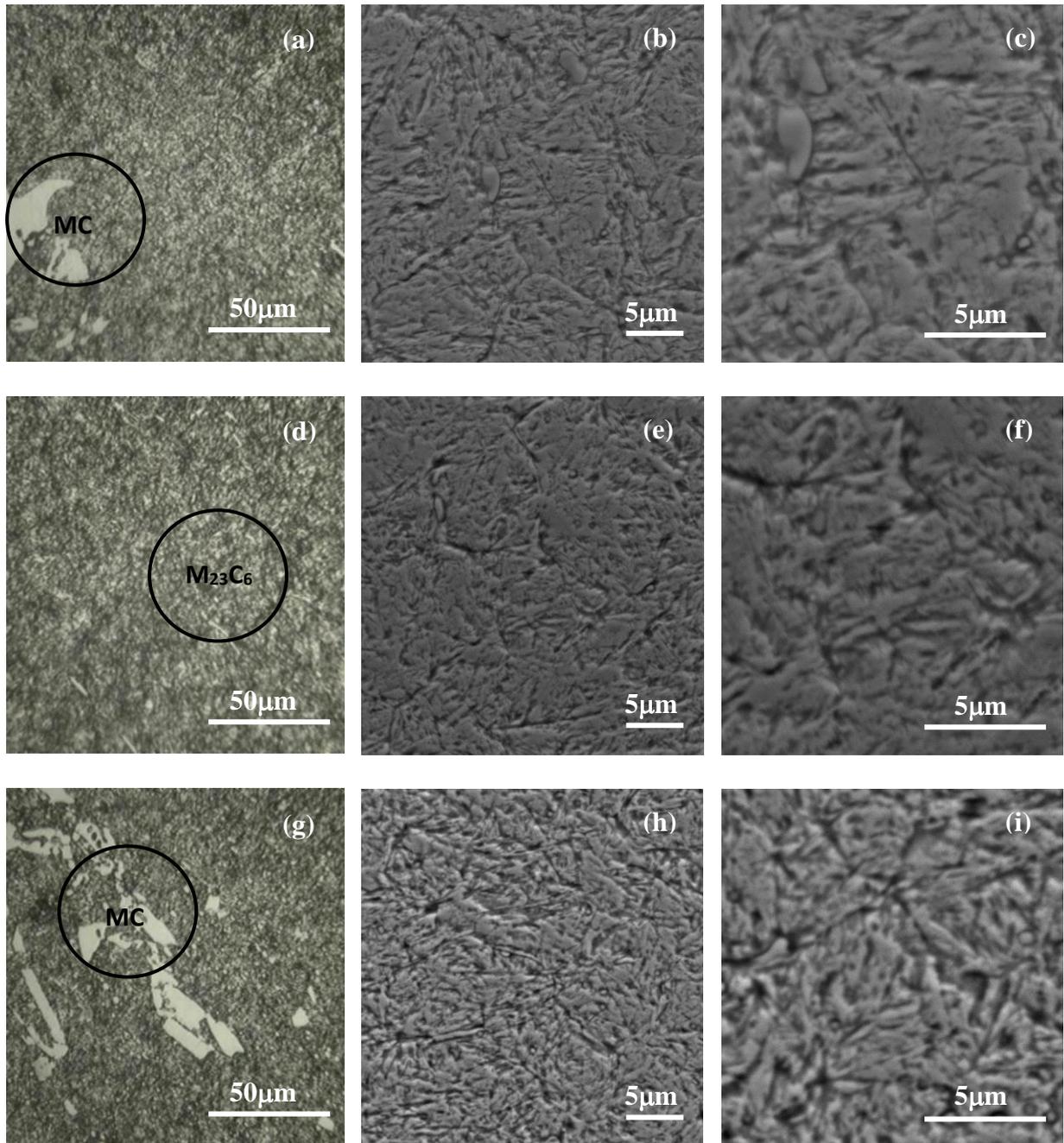
4.4.1.2 Rolo de aço QCM8

Figura 29 – Micrografias (MO e MEV) do aço QCM8 – Amostra 1 (superfície)



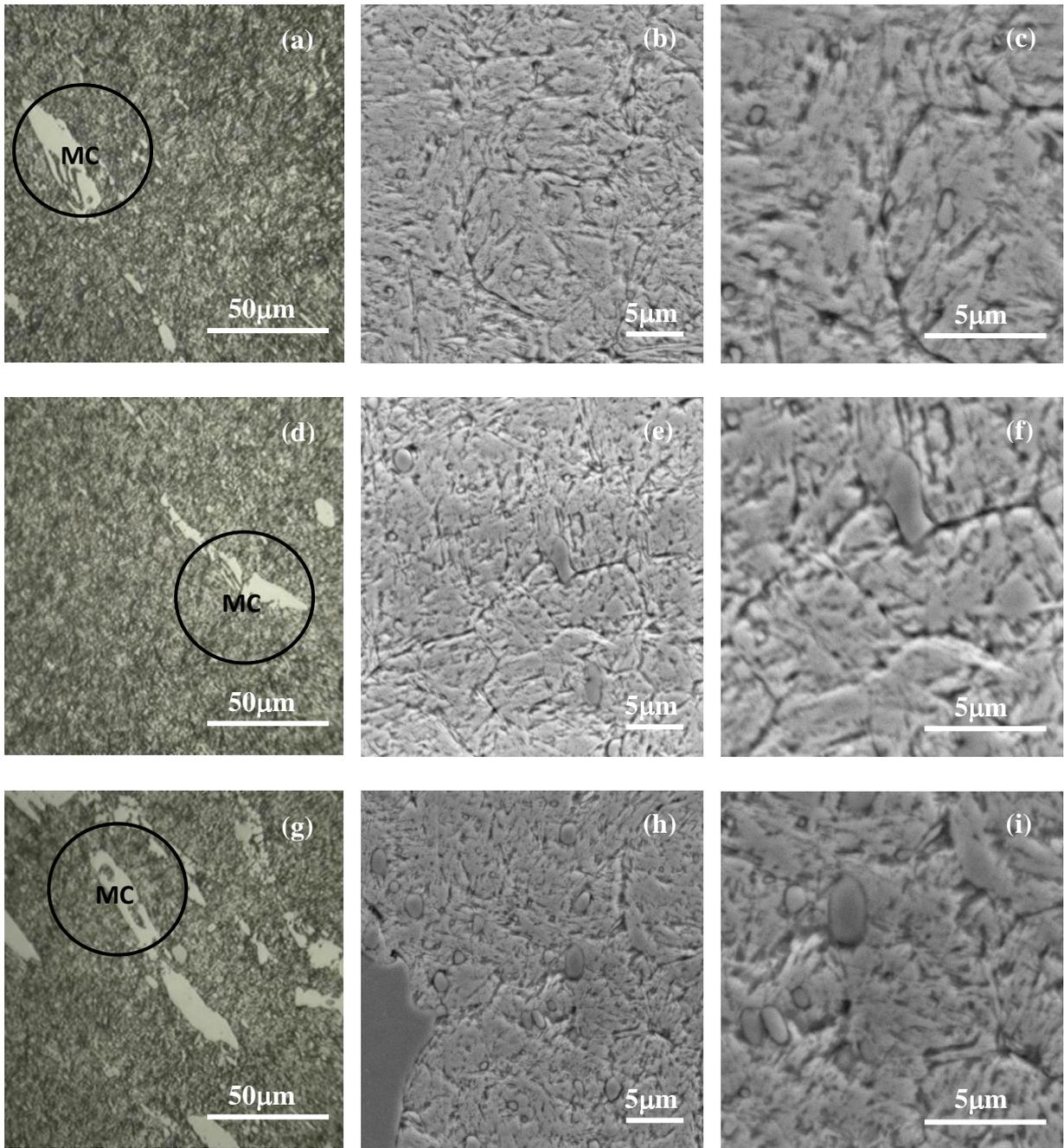
(a), (b) e (c) região R1; (d), (e) e (f) região R2; (g), (h) e (i) região R3

Fonte: Próprio autor

Figura 30 – Micrografias (MO e MEV) do aço QCM8 – Amostra 2

(a), (b) e (c) região R1; (d), (e) e (f) região R2; (g), (h) e (i) região R3

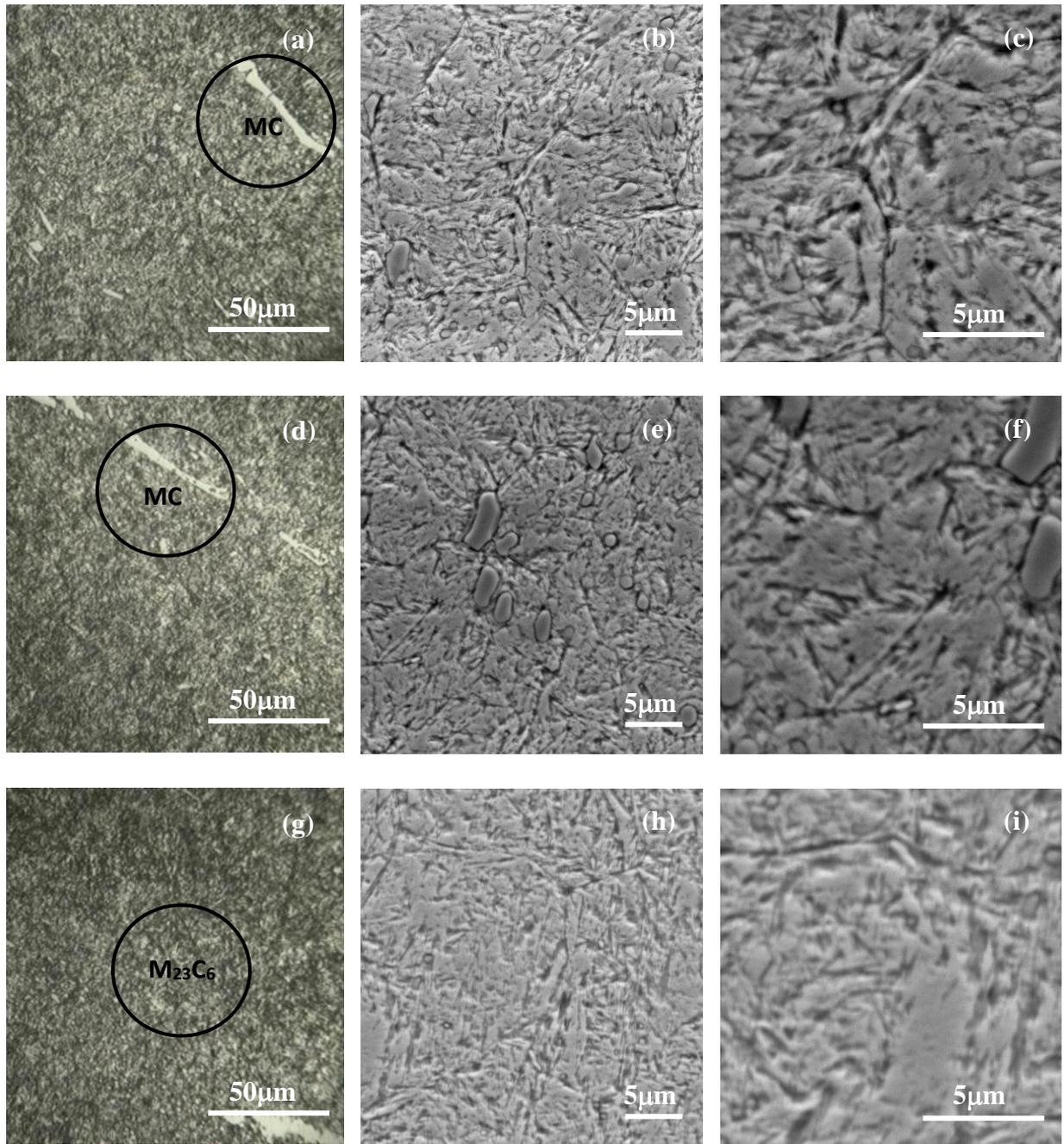
Fonte: Próprio autor

Figura 31 – Micrografias (MO e MEV) do aço QCM8 – Amostra 3

(a), (b) e (c) região R1; (d), (e) e (f) região R2; (g), (h) e (i) região R3

Fonte: Próprio autor

Figura 32 – Micrografias (MO e MEV) do aço QCM8 – Amostra 4

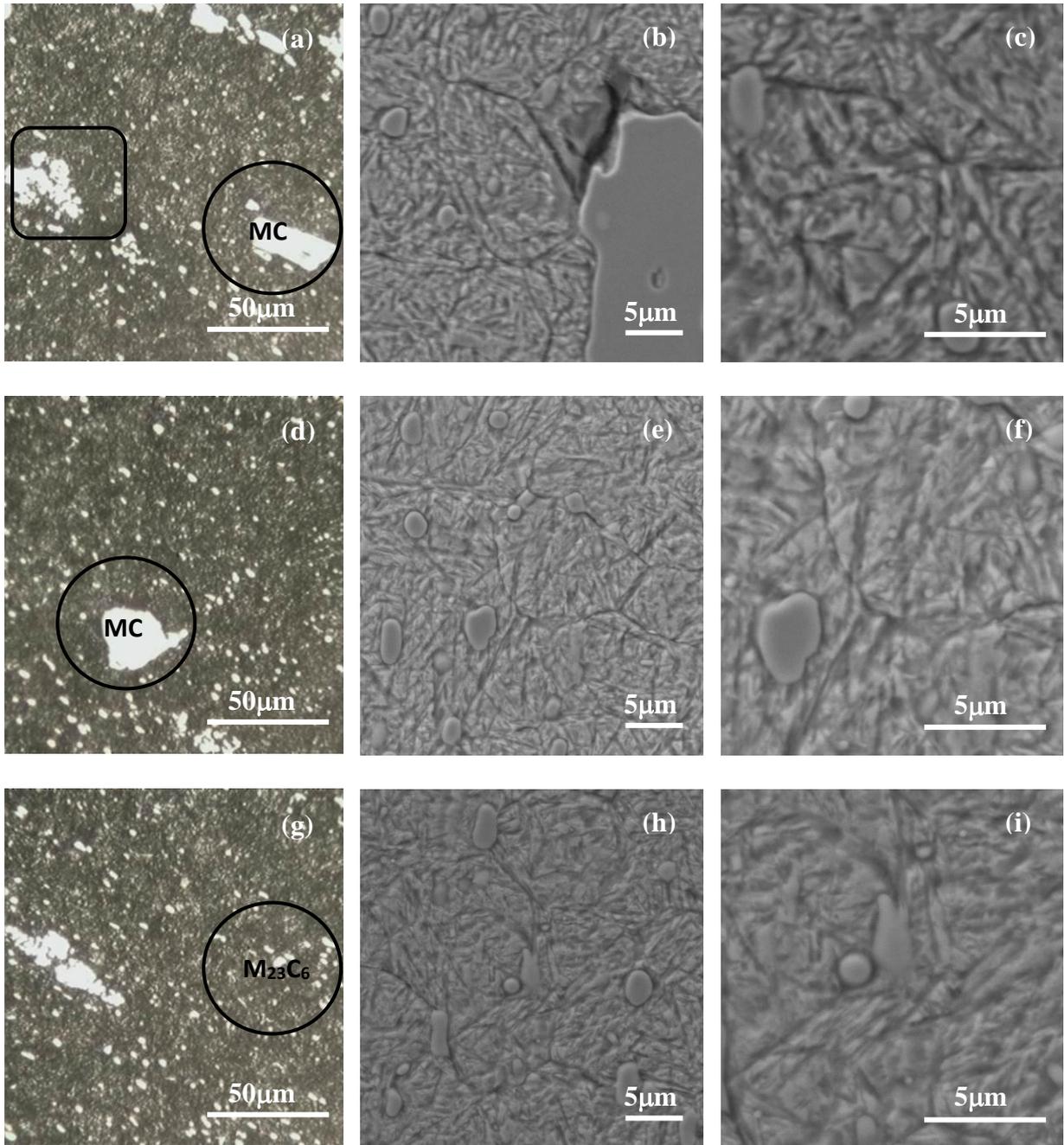


(a), (b) e (c) região R1; (d), (e) e (f) região R2; (g), (h) e (i) região R3

Fonte: Próprio autor

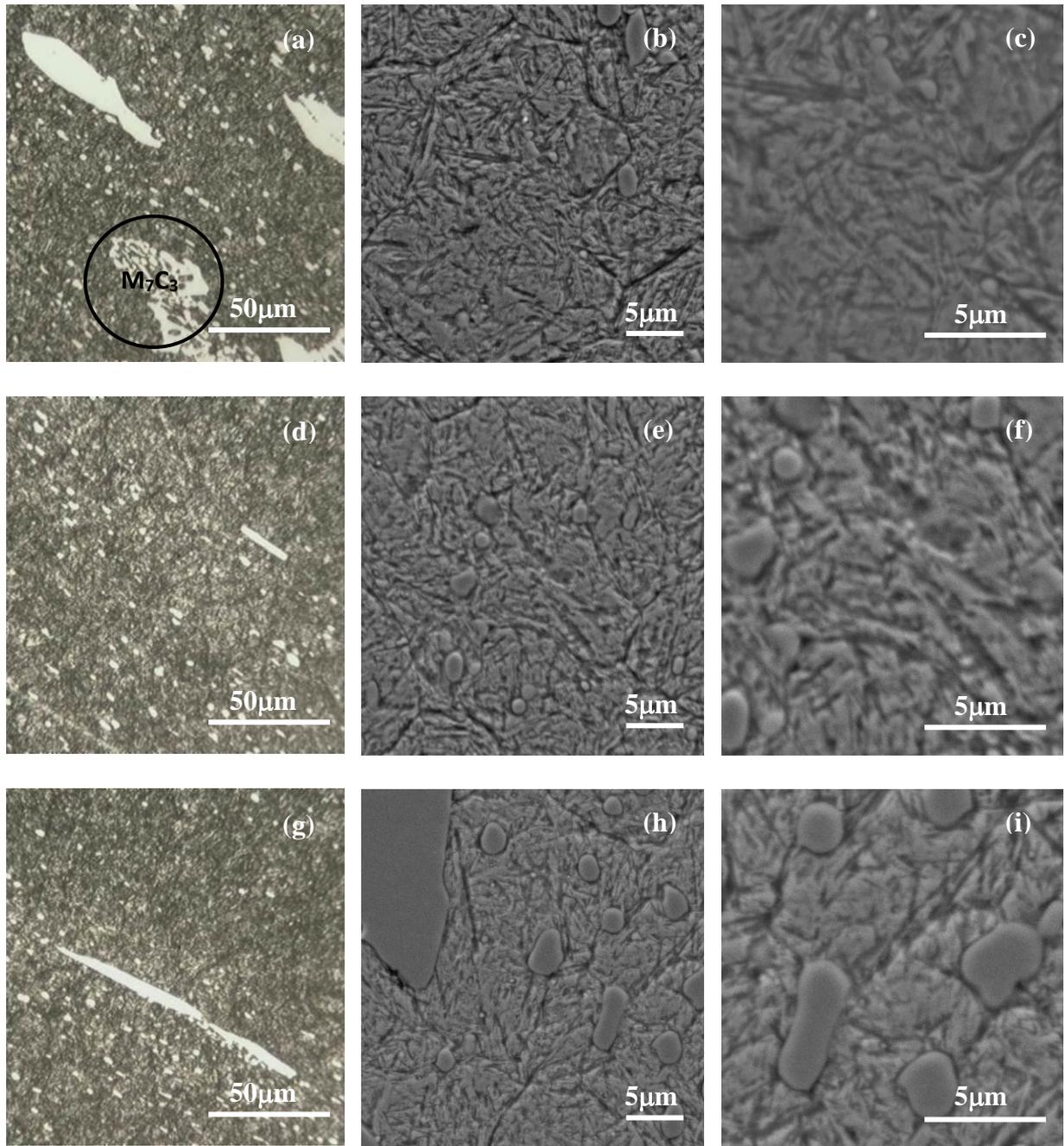
4.4.1.3 Rolo de aço Sleipner

Figura 33 – Micrografias (MO e MEV) do aço Sleipner – Amostra 1 (superfície)



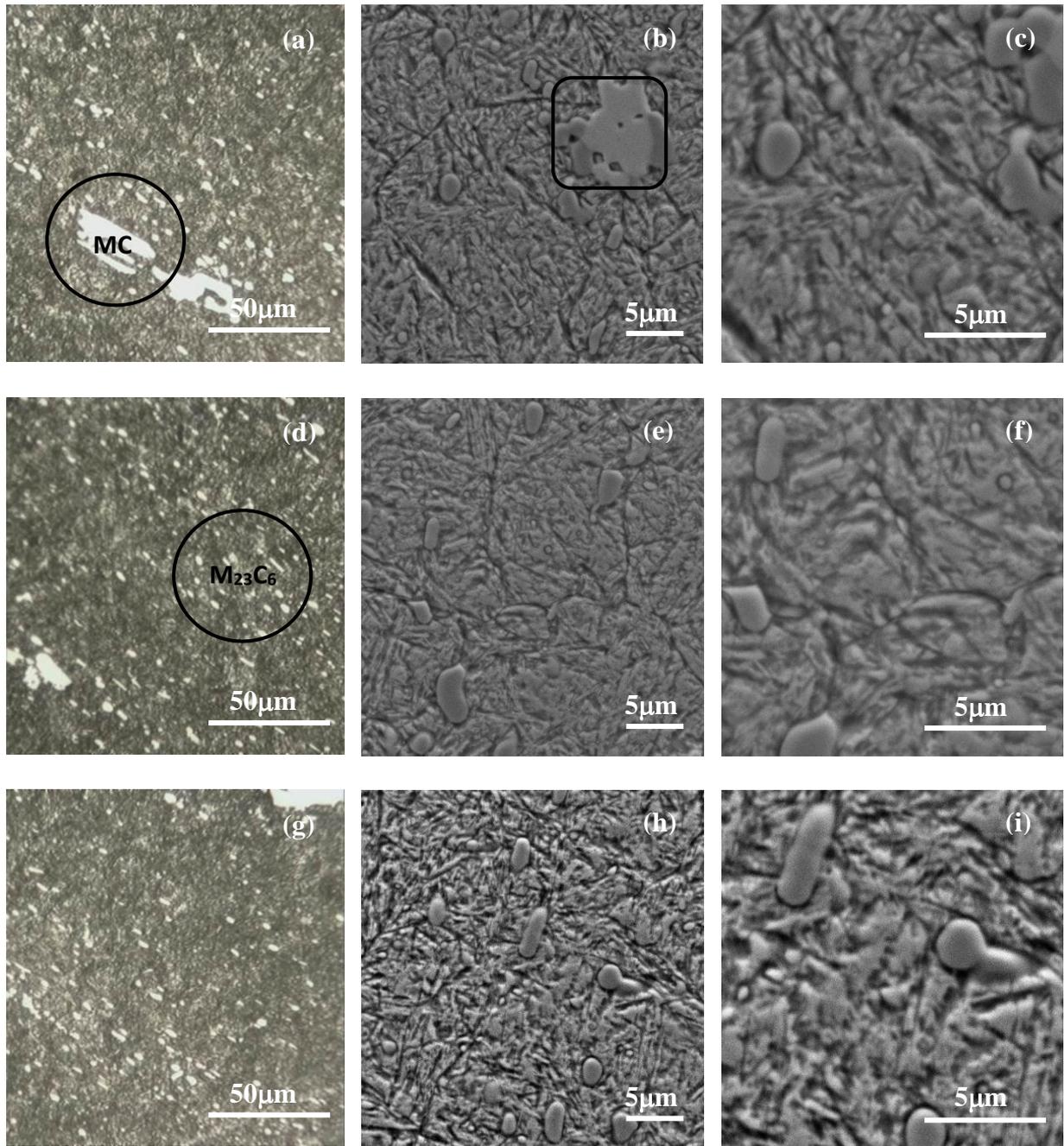
(a), (b) e (c) região R1; (d), (e) e (f) região R2; (g), (h) e (i) região R3

Fonte: Próprio autor

Figura 34 – Micrografias (MO e MEV) do aço Sleipner – Amostra 2

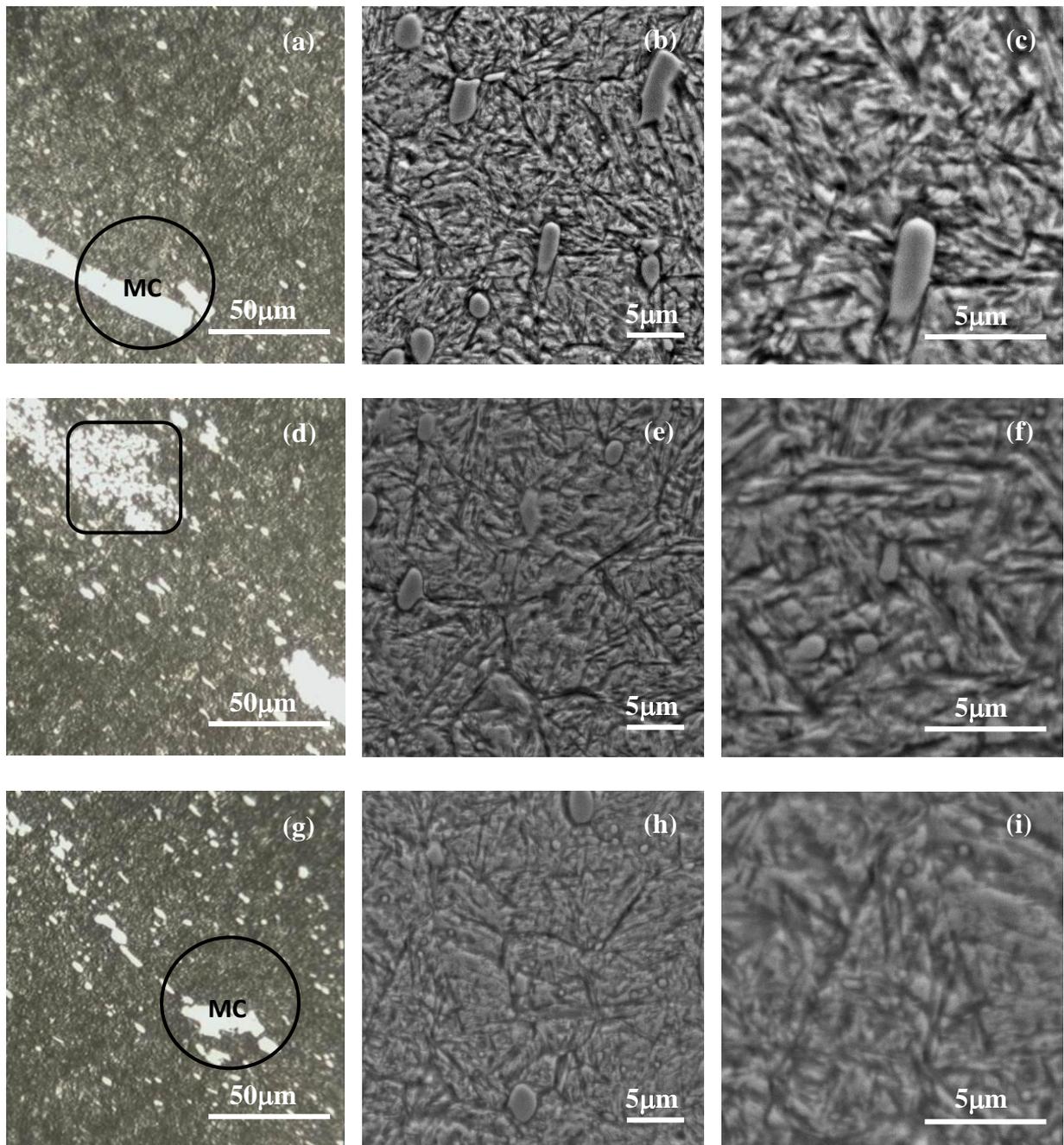
(a), (b) e (c) região R1; (d), (e) e (f) região R2; (g), (h) e (i) região R3

Fonte: Próprio autor

Figura 35 – Micrografias (MO e MEV) do aço Sleipner – Amostra 3

(a), (b) e (c) região R1; (d), (e) e (f) região R2; (g), (h) e (i) região R3

Fonte: Próprio autor

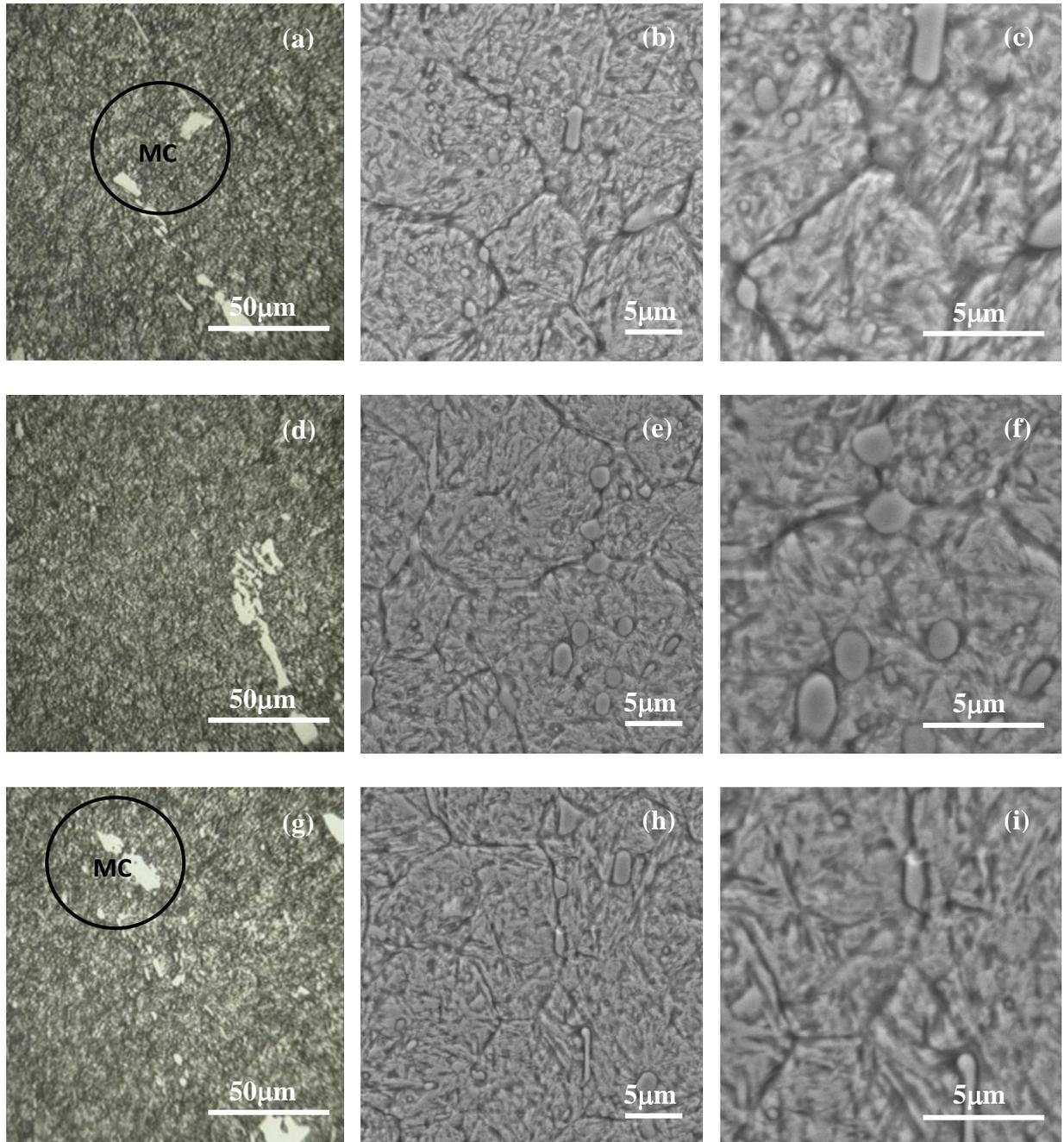
Figura 36 – Micrografias (MO e MEV) do aço Sleipner – Amostra 4

(a), (b) e (c) região R1; (d), (e) e (f) região R2; (g), (h) e (i) região R3

Fonte: Próprio autor

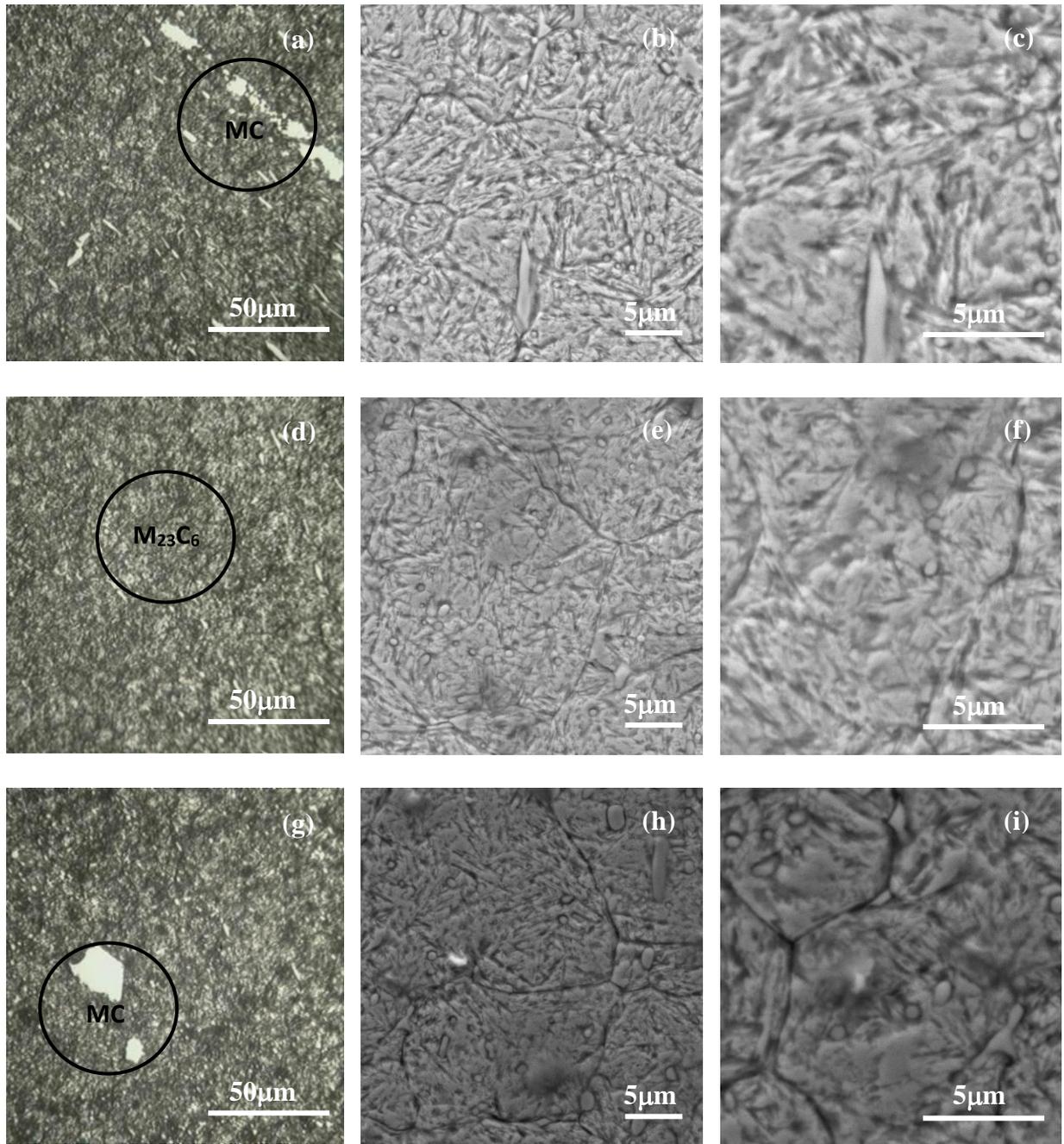
4.4.1.4 Rolo de aço VF800

Figura 37 – Micrografias (MO e MEV) do aço VF800 – Amostra 1 (superfície)



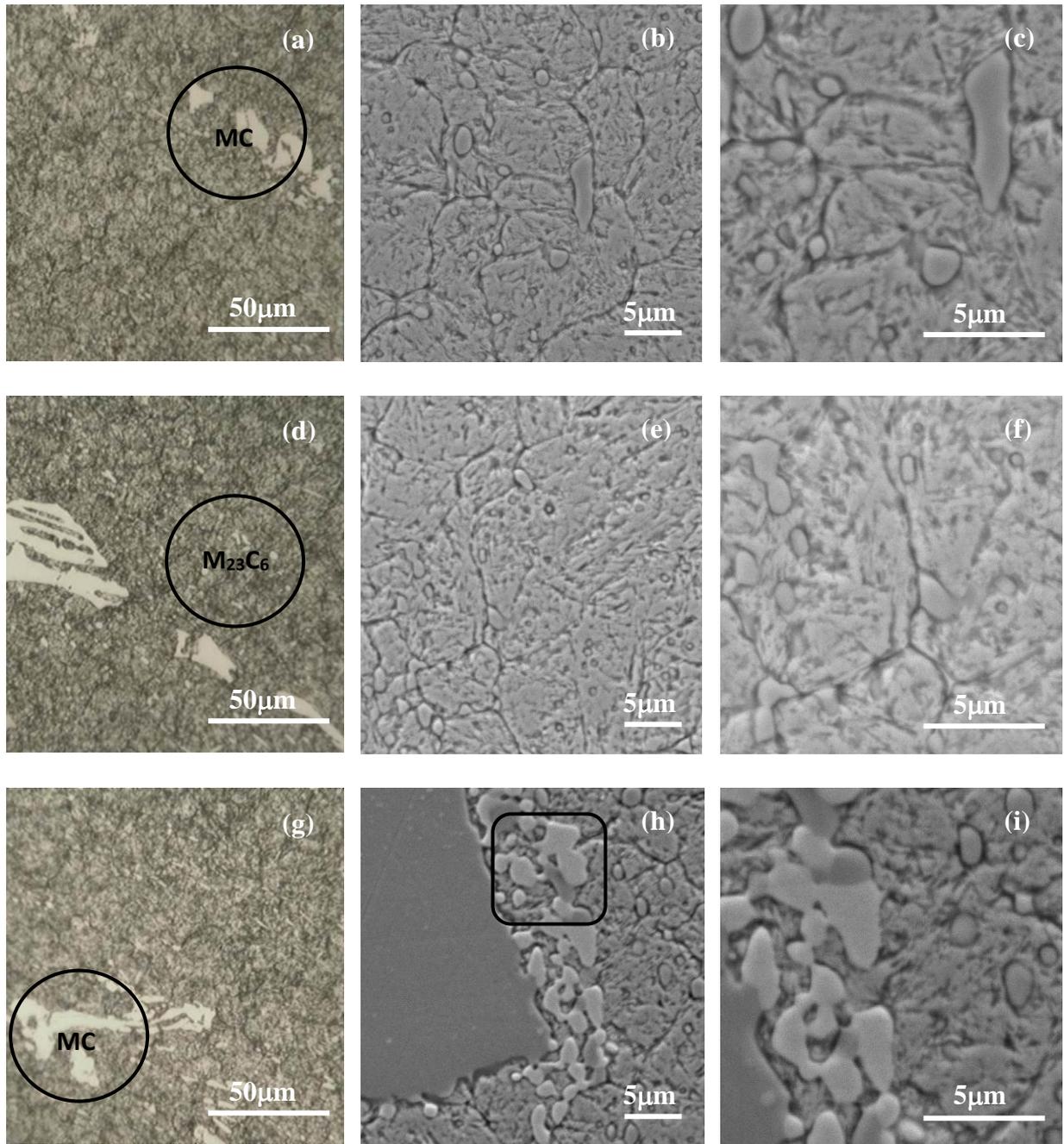
(a), (b) e (c) região R1; (d), (e) e (f) região R2; (g), (h) e (i) região R3

Fonte: Próprio autor

Figura 38 – Micrografias (MO e MEV) do aço VF800 – Amostra 2

(a), (b) e (c) região R1; (d), (e) e (f) região R2; (g), (h) e (i) região R3

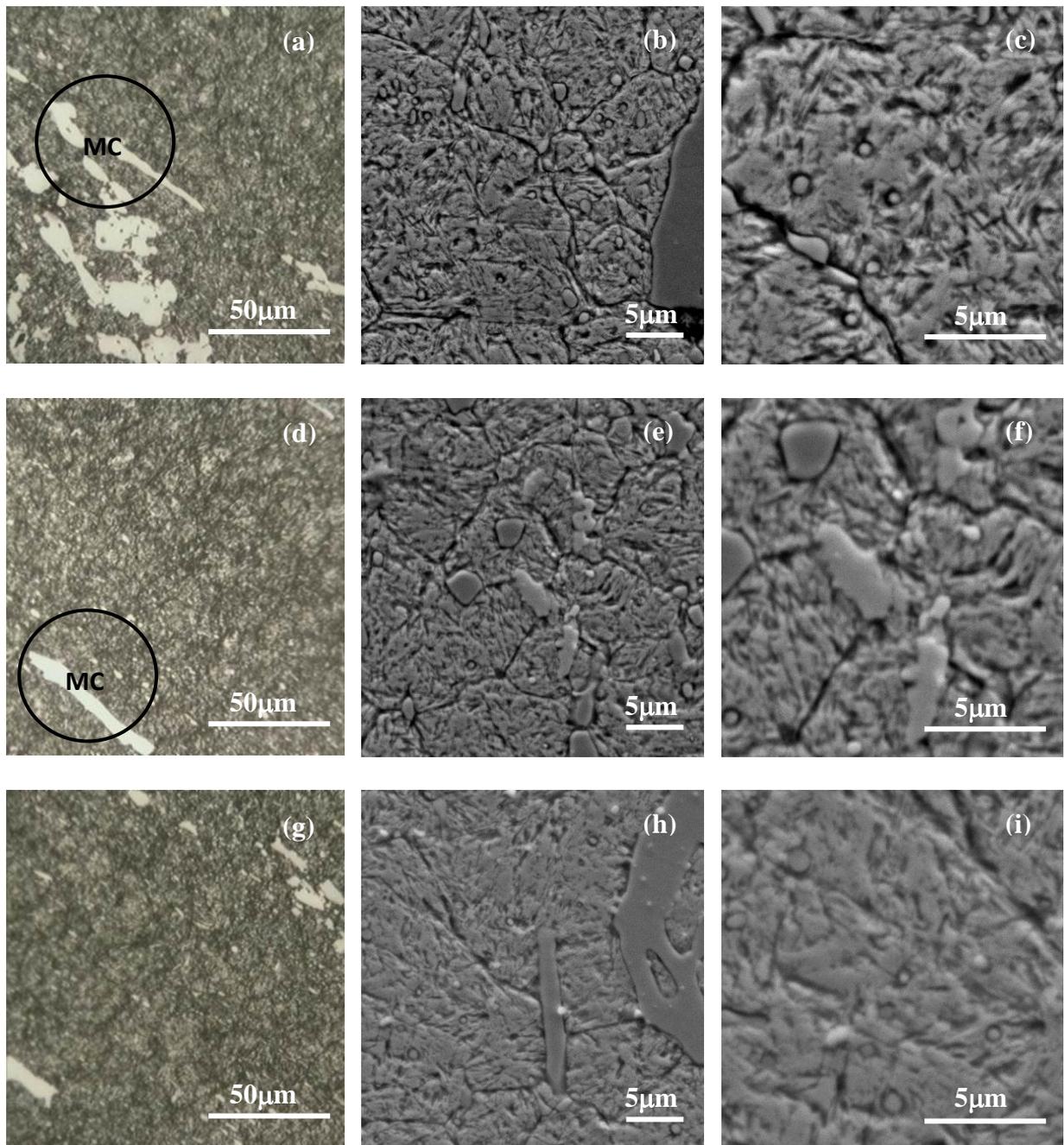
Fonte: Próprio autor

Figura 39 – Micrografias (MO e MEV) do aço VF800 – Amostra 3

(a), (b) e (c) região R1; (d), (e) e (f) região R2; (g), (h) e (i) região R3

Fonte: Próprio autor

Figura 40 – Micrografias (MO e MEV) do aço VF800 – Amostra 4



(a), (b) e (c) região R1; (d), (e) e (f) região R2; (g), (h) e (i) região R3

Fonte: Próprio autor

A análise microestrutural dos aços em questão, como esperado, mostrou uma estrutura típica de aços ferramenta, isto é, uma microestrutura composta por carbonetos primários dentro de uma matriz de martensita temperada, com a presença de carbonetos secundários (VITRY et al., 2012). Tal estrutura é formada principalmente durante a solidificação e só pode ser modificada por tratamento térmico ou trabalho a quente, sendo fortemente

influenciada pela composição da liga e pela taxa de solidificação (RODENBURG, 2007, *apud* VITRY et al., 2012, p.372).

Segundo Pippel et al. (1999), durante o recozimento e revenimento, especialmente V, Mo, W e Cr formam carbonetos de diferentes tamanhos e composição química, o que influencia fortemente a tenacidade e a resistência mecânica do aço ferramenta.

Nos aços ferramenta, os principais carbonetos formados são: MC, M₂C, M₆C, M₇C₃ e M₂₃C₆, sendo que a letra “M” se refere aos elementos metálicos que os formam (HETZNER; GEERTRUYDEN, 2008). De acordo com Ghomaschi e Sellars (1984 *apud* RONG et al., 1992), dependendo da composição química da liga, os carbonetos que formam durante a solidificação são: M₂C, MC, M₆C e as vezes M₂₃C₆. Durante o recozimento e subsequente austenitização, o carboneto eutético metaestável M₂₃C₆ entra na solução (KAYSER; COHER, 1952, *apud* RONG et al., 1992), enquanto o M₂C se transforma em MC e M₆C, que são mais estáveis.

Esses tipos de carbonetos podem ser identificados por sua morfologia, composição química e sua localização no aço (VITRY et al., 2012), conforme mostra a tabela 15.

Tabela 15 – Identificação de carbonetos em aço-ferramenta (continua)

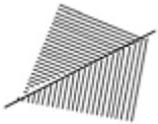
Tipo de carboneto	Morfologia	Química	Localização
MC	 <ul style="list-style-type: none"> • Globular • Grosso • Isolado ou associado 	<ul style="list-style-type: none"> • Principalmente V • Secundário Mo, W, Cr 	Centro dos grãos ou contorno de grãos (em associação com M ₇ C ₃)
M ₂ C	 <ul style="list-style-type: none"> • Acicular (agulhas) ou lamelar • Associado 	<ul style="list-style-type: none"> • Principalmente Mo, W • Secundário Cr, Fe, V 	Áreas interdendríticas
M ₆ C	 <ul style="list-style-type: none"> • Lamelas finas (espinha de peixe) • Associado 	<ul style="list-style-type: none"> • Principalmente Mo, W • Secundário Cr, Fe, W, V 	Áreas de forte resfriamento (primeiros 5mm da superfície)
M ₇ C ₃	 <ul style="list-style-type: none"> • Lamelas grossas (espinha de peixe) • Associado 	<ul style="list-style-type: none"> • Principalmente Fe, Cr • Secundário Mo, V, W 	Áreas interdendríticas

Tabela 15 – Identificação de carbonetos em aço-ferramenta (conclusão)

Tipo de carboneto	Morfologia	Química	Localização
$M_{23}C_6$	 <ul style="list-style-type: none"> • Glóbulos pequenos • Isolados 	<ul style="list-style-type: none"> • Principalmente Cr, Fe • Secundário Mo, W, V 	Homogeneamente distribuídos na matriz

Fonte: VITRY et al., 2012 (adaptado)

Ressalta-se que uma vez que não foi possível determinar se os carbonetos foram formados durante a solidificação (carbonetos primários) ou durante o revenimento (carbonetos secundários), os mesmos foram referidos no presente trabalho como “carboneto maior” e “carboneto menor”. Além disso, destaca-se que a classificação do tipo de carboneto presente nos aços estudados, mostrada a seguir, foi conduzida de acordo com a tabela 15 e baseada nos resultados de EDS. Para se obter um resultado mais preciso sobre o tipo e a quantidade de carbonetos, seria necessária a realização de Difração de Raios-X.

As análises de MO e MEV mostraram que o aço VD2 foi o que apresentou a maior quantidade de carbonetos quando comparado aos demais, o que já era esperado devido ao seu maior teor de carbono e à maior presença de elementos de liga. Segundo Rong et al. (1992), o principal efeito de aumentar o carbono e os elementos formadores de carbonetos é aumentar a fração volumétrica de carbonetos primários grossos, o que foi verificado nesse caso.

Nesse aço foram distinguidos carbonetos dos tipos M_7C_3 (figura 26 (a) e (g); figura 27 (g); figura 28 (d)), MC (figura 25 (g); figura 26 (d); figura 27 (a) e (d)), M_2C (figura 26 (a)) e $M_{23}C_6$ (figura 26 (d); figura 28 (g)), com predominância dos tipos $M_{23}C_6$ e M_7C_3 . Os “carbonetos maiores” (M_7C_3 , MC e M_2C) não se mostraram distribuídos homogeneamente nas 4 amostras analisadas, enquanto os “menores” ($M_{23}C_6$) apresentaram mais uniformidade. O alto teor de carbonetos M_7C_3 já era esperado devido ao alto teor de cromo presente nesse aço.

De acordo com Krauss e Kennedy (1998 *apud* TORKAMANI; RAYGAN; RASSIZADEHGHANI, 2014) durante o revenimento do aço AISI D2, grandes volumes de carbonetos secundários (principalmente M_7C_3) são precipitados devido ao seu alto teor de carbono e elementos de liga, e que desde que o teor de cromo é alto, “M” seria na maioria Cr.

Das, Dutta e Ray. (2010), em um estudo do aço AISI D2, classificaram como carbonetos primários os com tamanho maior que $5\mu m$ e os secundários, os com tamanho menor ou igual a $5\mu m$. Os carbonetos secundários foram sub-classificados em carbonetos secundários grandes (maiores que $1\mu m$ e menores ou iguais a $5\mu m$) e carbonetos secundários

pequenos (maiores ou iguais a 0,1 μ m e menores ou iguais a 1 μ m). A microestrutura encontrada para o aço D2 por Das, Dutta e Ray (2010) foi similar à encontrada no presente trabalho: distribuição não uniforme dos carbonetos primários M_7C_3 e distribuição bastante uniforme dos carbonetos secundários $M_{23}C_6$.

Bourithis, Papadimitriou e Sideris (2006) também detectaram a presença de carbonetos do tipo $(Fe,Cr)_7C_3$ (M_7C_3) no aço AISI D2 e confirmaram se tratar de carbonetos primários, em concordância com o estudo de Das, Dutta e Ray (2010).

A identificação de carbonetos do tipo M_2C no aço VD2 pode ser justificada pelo fato de não ter havido decomposição completa desse carboneto em carbonetos MC. Segundo Pippel et al. (1999), os carbonetos MC são termodinamicamente estáveis, enquanto o M_2C é metaestável e formado imediatamente sob rápida solidificação. Durante o recozimento em altas temperaturas, os carbonetos M_2C reagem com a matriz austenítica e decompõem-se formando carbonetos MC e M_6C , de acordo com a seguinte reação: $M_2C + \gamma \rightarrow M_6C + MC + \alpha + C\gamma$. Durante essa reação, ferrita com alto teor de W, Mo e V, é formada e após o recozimento, os aços ferramenta contêm uma matriz ferrítica com carbonetos primários.

O aço QCM8 apresentou predominantemente carbonetos do tipo MC (figura 29 (a), (d), (g); figura 30 (a) e (g), figura 31 (a), (d) e (g), e figura 32 (a) e (d)) e $M_{23}C_6$ (figura 30 (d); figura 32 (g)). Os carbonetos MC, identificados aqui como sendo os maiores, mostraram uma distribuição não homogênea ao longo das 4 amostras analisadas. Por outro lado, os carbonetos $M_{23}C_6$ mostraram-se fina e homogeneamente distribuídos por toda a matriz martensítica, como pode-se observar nas imagens de MEV das figuras 29, 30, 31 e 32.

Nas análises microestruturais do aço Sleipner percebe-se a presença de carbonetos do tipo MC (figura 33 (a) e (d); figura 35 (a); figura 36 (a) e (g)), M_7C_3 (figura 34 (a)) e $M_{23}C_6$ (figura 33 (g); figura 35 (d)). Os “carbonetos maiores”, do tipo MC e M_7C_3 , apresentam uma distribuição uniforme ao longo da matriz, porém, os carbonetos M_7C_3 estão presentes em menor quantidade do que no aço VD2. Do mesmo modo, foi observada uma distribuição homogênea dos “carbonetos menores” do tipo $M_{23}C_6$, os quais mostraram-se maiores do que os observados no aço QCM8. Essa uniformidade tanto dos “carbonetos maiores” quanto dos “menores” nesse aço, justificam sua maior homogeneidade observada no perfil de durezas.

No aço VF800, assim como no QCM8, foi constatada a predominância de carbonetos do tipo MC (figura 37 (a), e (g); figura 38 (a) e (g); figura 39 (a) e (g); figura 40 (a) e (d)), e $M_{23}C_6$ (figura 38 (d); figura 39 (d)). Os do tipo MC mostraram-se distribuídos heterogeneamente pela matriz, enquanto os do tipo $M_{23}C_6$, de tamanho comparável aos do QCM8 e menores do que os dos aços Sleipner e VD2, apresentaram distribuição uniforme.

O maior refinamento dos carbonetos nos aços QCM8 e VF800 sugere que a taxa de solidificação após o lingotamento foi maior nesses aços.

Não foi observada nenhuma diferença significativa entre a microestrutura das 4 amostras em cada um dos aços, o que confirma a têmpera total e justifica também o fato de a dureza ter se mantido praticamente constante entre elas. Tendo em vista a aplicação em cilindros de laminação, esse fato permite que haja uma recuperação (usinagem superficial) após uma eventual falha dos mesmos, pois mesmo com uma diminuição no diâmetro externo, as propriedades do aço serão mantidas.

Vale ressaltar que nos aços Sleipner e VF800 foi identificado um tipo de carboneto na forma de “cacho de uva” (figura 33 (a); figura 36 (d)), de coloração mais clara (figura 35 (b) e figura 39 (h)) e com presença de enxofre, tipo não reportado na literatura.

“Além da fração volumétrica, a distribuição e a morfologia dos carbonetos podem também afetar fortemente as propriedades mecânicas do aço” (TORKAMANI; RAYDAN; RASSIZADEHGHANI, 2014, tradução nossa).

Segundo Pippel et al. (1999), os carbonetos primários e sua distribuição têm uma grande influência na resistência ao desgaste e tenacidade do material. Os carbonetos primários grossos são responsáveis pela resistência ao desgaste do material, porém os carbonetos secundários também promovem uma importante contribuição na força, resistência ao desgaste e dureza total, pois promovem o endurecimento secundário (GHOMASCHCHI; SELLARS, 1984, *apud* RONG et al., 1992).

Carbonetos primários, principalmente MC e M_6C são mais duros do que a matriz (1500HV a 2800HV) o que contribui para o aumento da resistência ao desgaste abrasivo de aços contendo alto teor desses carbonetos (DUNLOP, 1990, *apud* BADISH; MITTERER, 2003, p. 765). Diante disso, pode-se dizer que o aço VD2 por ter apresentado maior quantidade de carbonetos grossos, principalmente do tipo MC é o que tende a possuir maior resistência ao desgaste abrasivo frente aos demais.

Por outro lado, os carbonetos primários no aço AISI D2 são aglomerados em regiões interdendríticas e sua distribuição não uniforme facilita seu trincamento da matriz em um baixo nível de tensão. Assim, “fraturas em carbonetos primários do aço AISI D2 são frequentemente observadas porque tais carbonetos são grandes e alongados por natureza e assim, são propensos a falha em um menor nível de tensão” (DAS et al., 2010, tradução nossa). Ainda segundo Das et al. (2010), os carbonetos do tipo M_7C_3 são conhecidos por serem muito frágeis, o que para a aplicação em cilindros de laminação é uma desvantagem do aço VD2 comparado aos demais aços que não apresentaram esse tipo de carboneto.

Além disso, o aço VD2 possui menor temperatura de revenimento (190°C) em relação aos demais (>500°C) o que também faz com que esse aço tenha menor tenacidade e maior teor de austenita retida, o que o torna mais frágil e mais susceptível à falha.

Tendo em vista que a falha mais comum em rolos de laminação é a falha por fadiga devido aos esforços cíclicos de tração e compressão, uma microestrutura que proporcione maior vida em fadiga propiciará maior vida útil aos rolos.

Conforme Das et al. (2010), a fratura inicia-se pela trinca em carbonetos primários ou nas interfaces entre carbonetos primários e matriz e/ou pela nucleação de microvazios pela decoesão de carbonetos secundários. Devido às características de não-deformabilidade dos carbonetos secundários, a decoesão de microvazios ocorre como resultado da concentração de tensão ao redor dessas partículas. Desse modo, “a quantidade, tamanho e distribuição de carbonetos secundários e também a ductilidade da matriz tem grande influência na nucleação, crescimento e coalescimento de vazios e na fratura final do aço” (DAS et al., 2010).

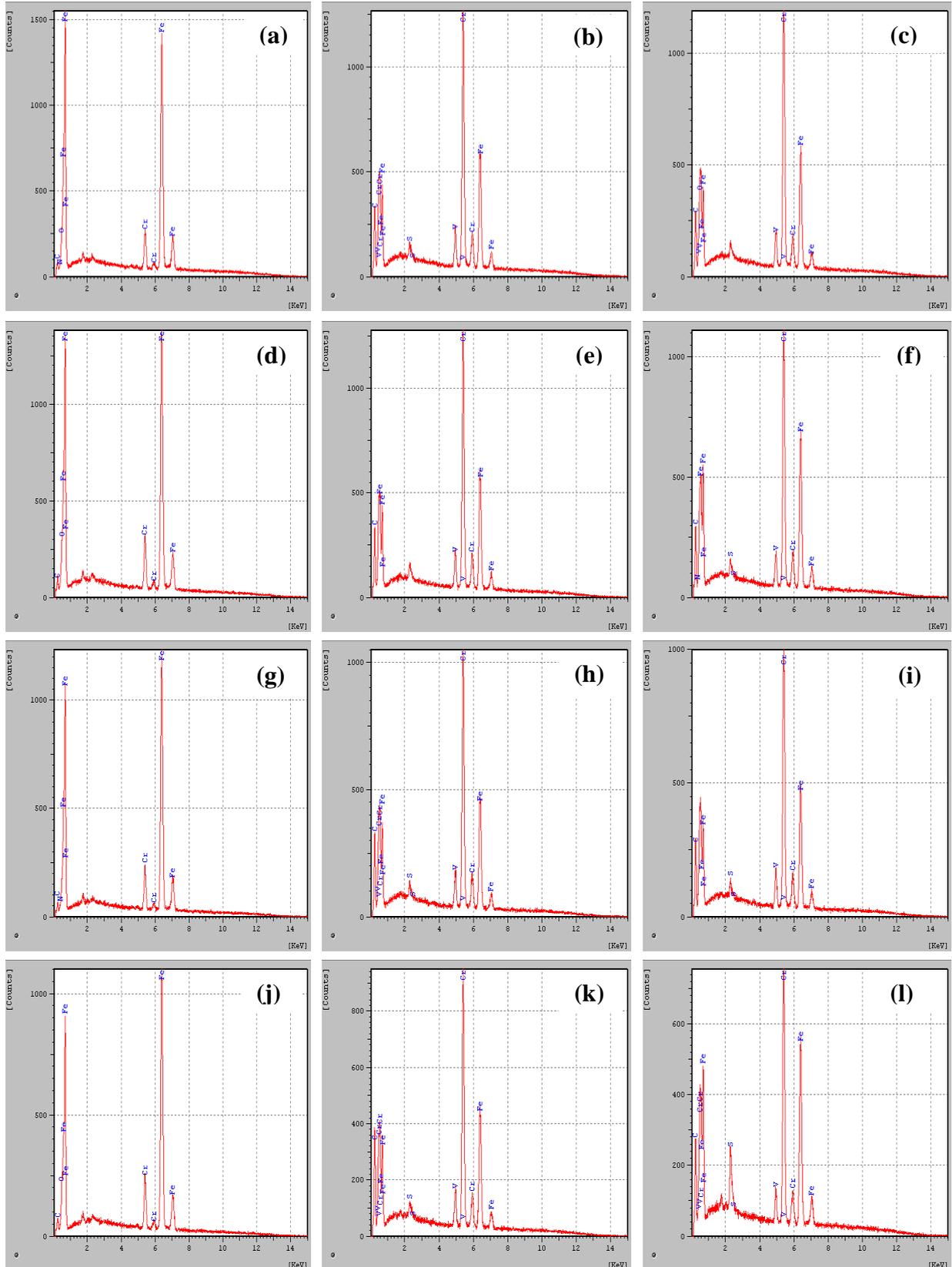
Em se tratando de aço ferramenta, um aço ideal para os cilindros de laminação seria aquele que proporcionasse alta dureza, para dar resistência ao desgaste, aliada à alta tenacidade, para suportar os esforços mecânicos e aumentar a resistência ao impacto.

Sendo assim, os aços VF800 e QCM8, dentre os quatro analisados, foram os que proporcionariam melhores propriedades aos rolos de laminação, uma vez que possuem “carbonetos menores” e homoganeamente espalhados e, relativamente poucos “carbonetos maiores”. “O refinamento de carbonetos juntamente com alta densidade pode melhorar a dureza e a tenacidade do aço” (DAS et al., 2010 *apud* TORKAMANI; RAYGAN; RASSIZADEHGHANI, 2014, tradução nossa), pois a formação de grande quantidade de carbonetos secundários aumenta a ductilidade da matriz pela redução da quantidade de carbono dissolvido e elementos de liga. Além disso, para Torkamani, Raygan e Rassizadehghani (2014), grande número de carbonetos finos melhoram a tenacidade, pois agem como barreira a falhas. Os carbonetos grosseiros além de centros concentradores de tensão, são pontos de iniciação e propagação de trincas. Por esse motivo, o aço Sleipner, apesar de ter apresentado carbonetos distribuídos homoganeamente, pode não ser ideal para a aplicação tendo em vista que o motivo principal de falha é a fadiga.

4.4.2 EDS

Nas figuras 41, 42, 43 e 44 são apresentados os resultados obtidos pela análise de EDS para os aços VD2, QCM8, Sleipner e VF800, nessa ordem.

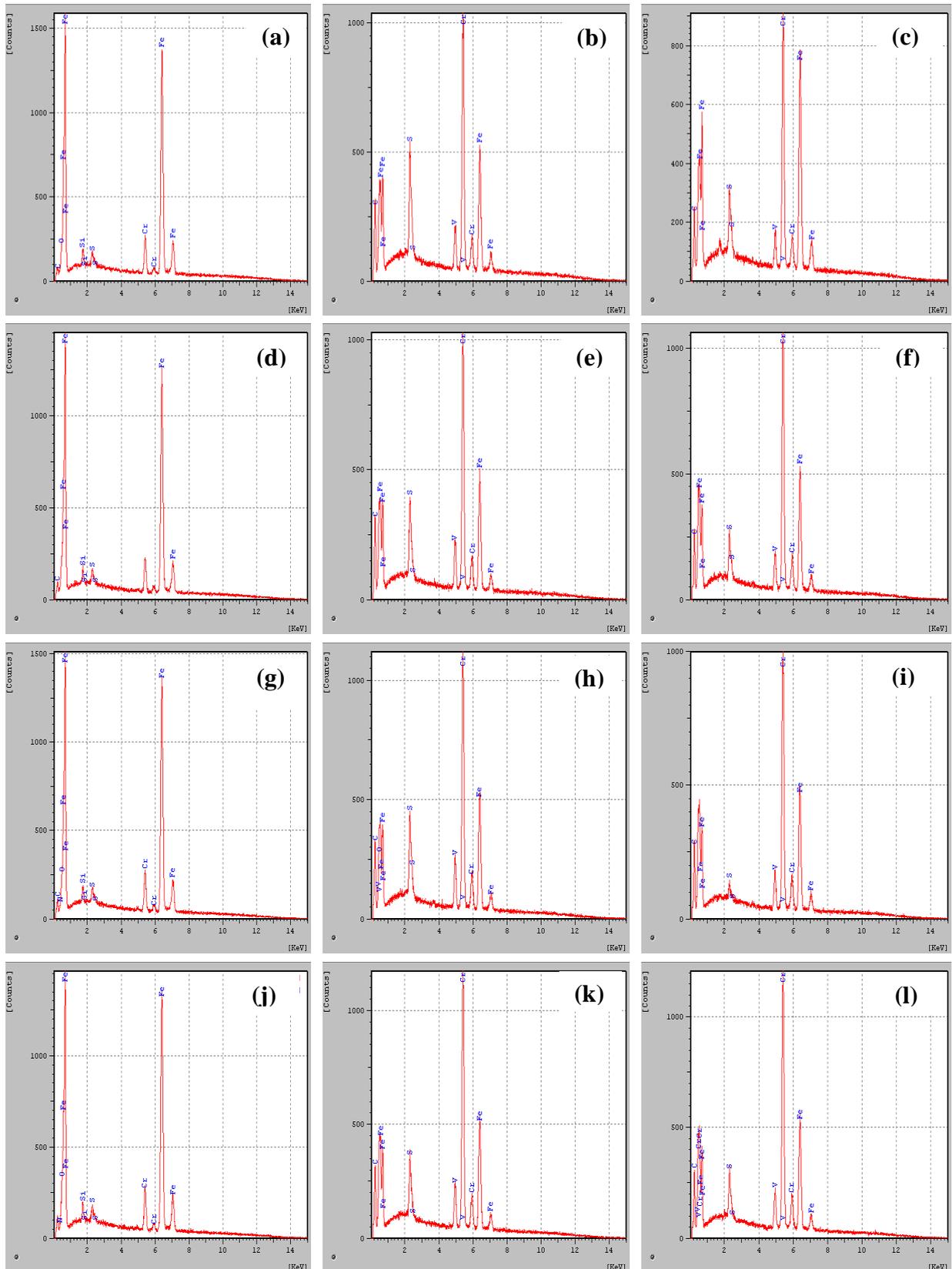
Figura 41 – Resultado da análise de EDS do aço VD2



Amostra 1 (a) matriz (b) carboneto “maior” (c) carboneto “menor”; Amostra 2 (d) matriz (e) carboneto “maior” (f) carboneto “menor”; Amostra 3 (g) matriz (h) carboneto “maior” (i) carboneto “menor”; Amostra 4 (j) matriz (k) carboneto “maior” (l) carboneto “menor”

Fonte: Próprio autor

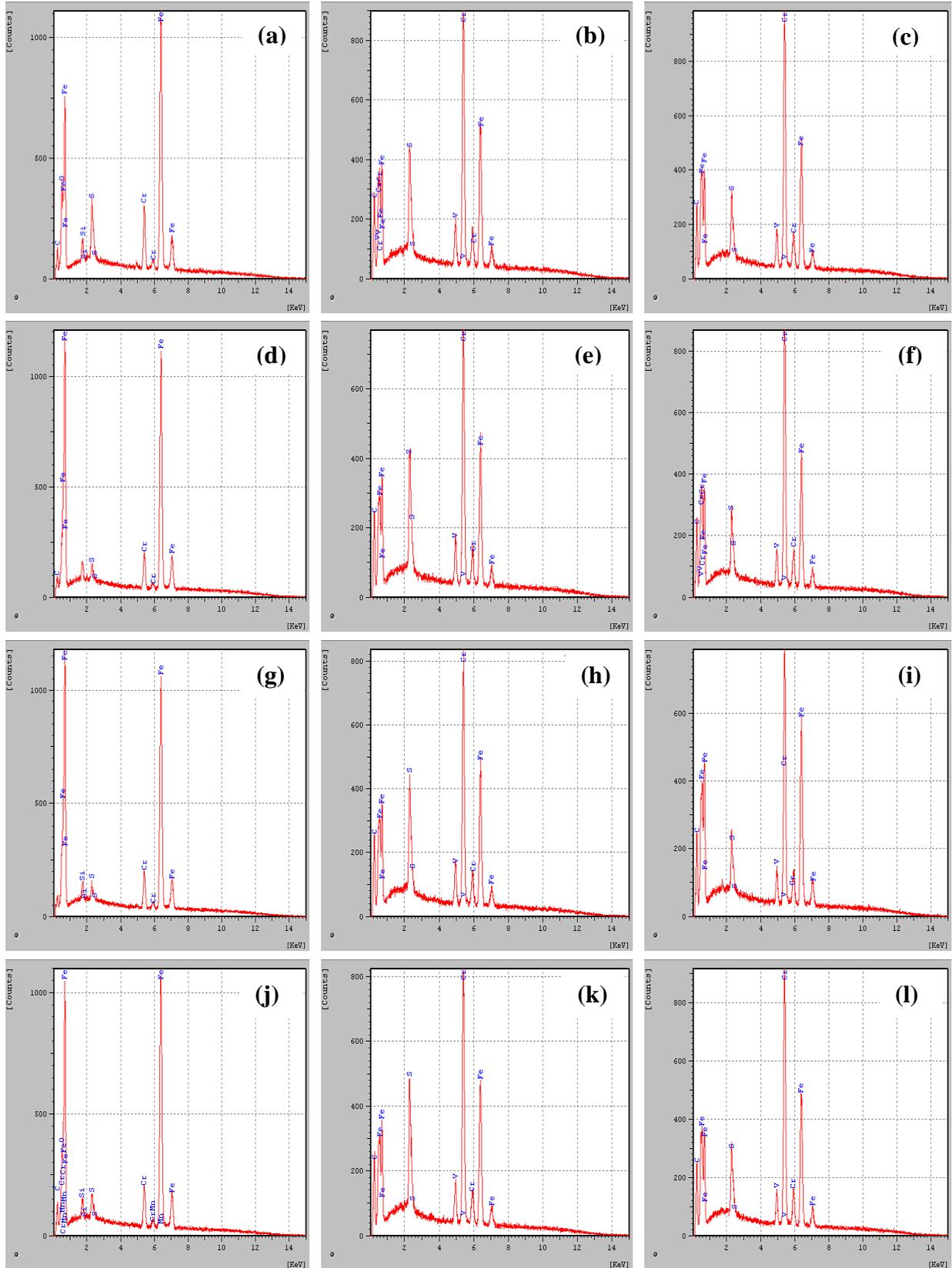
Figura 42 – Resultado da análise de EDS do aço QCM8



Amostra 1 (a) matriz (b) carboneto “maior” (c) carboneto “menor”; Amostra 2 (d) matriz (e) carboneto “maior” (f) carboneto “menor”; Amostra 3 (g) matriz (h) carboneto “maior” (i) carboneto “menor”; Amostra 4 (j) matriz (k) carboneto “maior” (l) carboneto “menor”

Fonte: Próprio autor

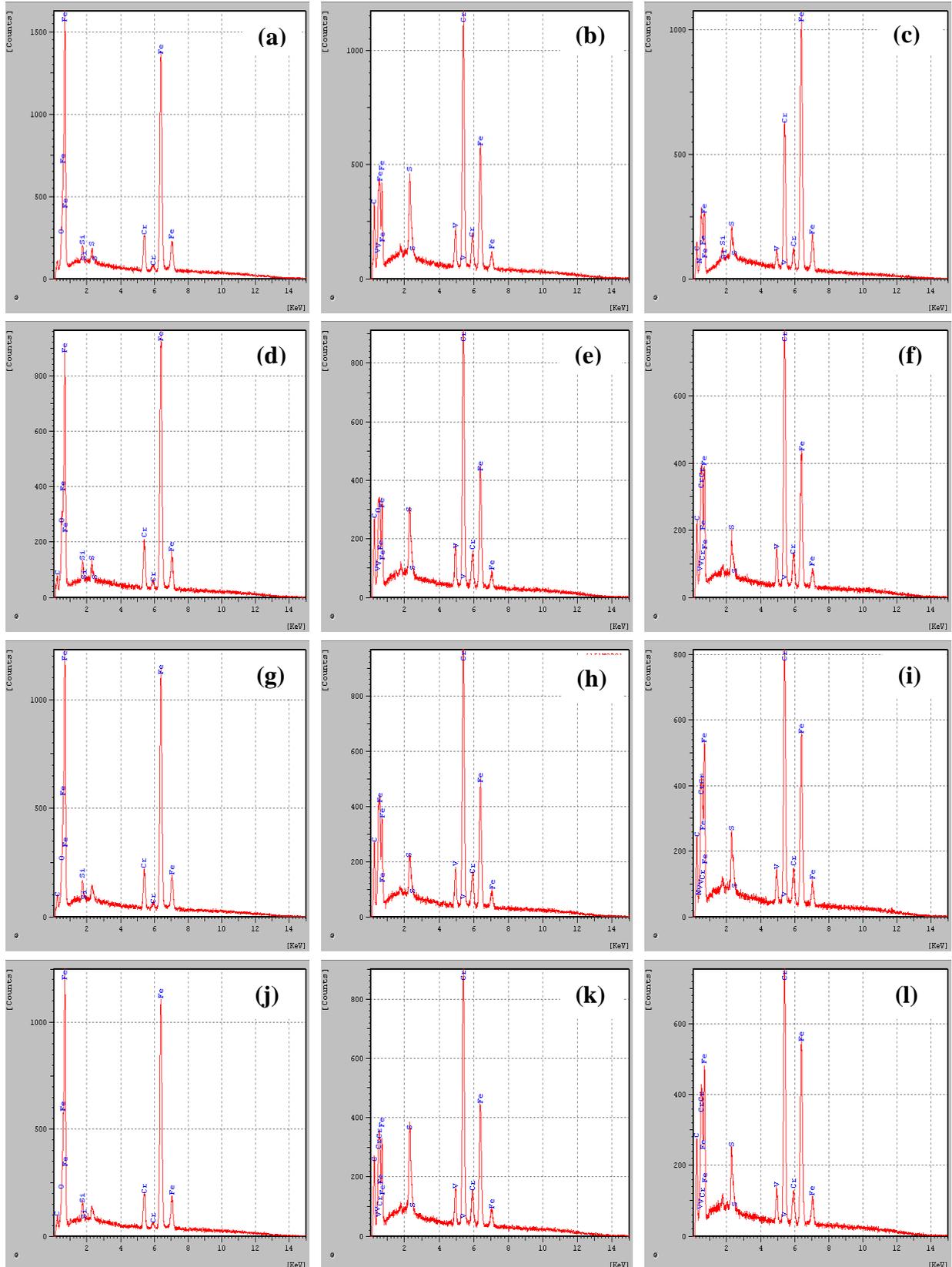
Figura 43 – Resultado da análise de EDS do aço Sleipner



Amostra 1 (a) matriz (b) carboneto “maior” (c) carboneto “menor”; Amostra 2 (d) matriz (e) carboneto “maior” (f) carboneto “menor”; Amostra 3 (g) matriz (h) carboneto “maior” (i) carboneto “menor”; Amostra 4 (j) matriz (k) carboneto “maior” (l) carboneto “menor”

Fonte: Próprio autor

Figura 44 – Resultado da análise de EDS do aço VF800



Amostra 1 (a) matriz (b) carboneto “maior” (c) carboneto “menor”; Amostra 2 (d) matriz (e) carboneto “maior” (f) carboneto “menor”; Amostra 3 (g) matriz (h) carboneto “maior” (i) carboneto “menor”; Amostra 4 (j) matriz (k) carboneto “maior” (l) carboneto “menor”

Fonte: Próprio autor

As tabelas 16, 17, 18 e 19 mostram os elementos detectados em cada região analisada nos aços VD2, QCM8, Sleipner e VF800, nessa ordem, como forma de facilitar a comparação. Ressalta-se que como o ensaio de EDS é um ensaio qualitativo, não foi possível precisar os teores dos elementos identificados.

Tabela 16 – Comparação dos elementos detectados na análise de EDS de acordo com os pontos analisados – Aço VD2

	Matriz	Carboneto “maior”	Carboneto “menor”
Amostra 1	Fe, C, O, Cr e N	Fe, C, Cr, V e S	Fe, C, O, Cr e V
Amostra 2	Fe, Cr, O e Cr	Fe, C, Cr e V	Fe, C, Cr, V, N e S
Amostra 3	Fe, C, Cr e N	Fe, C, Cr, V e S	Fe, C, Cr, V e S
Amostra 4	Fe, C, O e Cr	Fe, C, Cr, V e S	Fe, C, Cr, V, N e S

Fonte: Próprio autor

Tabela 17 – Comparação dos elementos detectados na análise de EDS de acordo com os pontos analisados – aço QCM8

	Matriz	Carboneto “maior”	Carboneto “menor”
Amostra 1	Fe, C, O, Cr, Si e S	Fe, C, Cr, V e S	Fe, C, Cr, V e S
Amostra 2	Fe, Cr, Si e S	Fe, C, Cr, V e S	Fe, C, Cr, V, e S
Amostra 3	Fe, C, O, Cr, Si, S e N	Fe, C, Cr, V, S e O	Fe, C, Cr, V, S e O
Amostra 4	Fe, O, Cr, Si, S e N	Fe, C, Cr, V e S	Fe, C, Cr, V e S

Fonte: Próprio autor

Tabela 18 – Comparação dos elementos detectados na análise de EDS de acordo com os pontos analisados – aço Sleipner (continua)

	Matriz	Carboneto “maior”	Carboneto “menor”
Amostra 1	Fe, C, O, Cr, Si e S	Fe, C, Cr, V e S	Fe, C, Cr V e S
Amostra 2	Fe, Cr, Cr e S	Fe, C, Cr, V e S	Fe, C, Cr, V e S
Amostra 3	Fe, Cr, Si e S	Fe, C, Cr, V e S	Fe, C, Cr, V e S

Tabela 18 – Comparação dos elementos detectados na análise de EDS de acordo com os pontos analisados – aço Sleipner (conclusão)

	Matriz	Carboneto “maior”	Carboneto “menor”
Amostra 4	Fe, C, O, Cr, Si, S e Mn	Fe, C, Cr, V e S	Fe, C, Cr, V, e S

Fonte: Próprio autor

Tabela 19 – Comparação dos elementos detectados na análise de EDS de acordo com os pontos analisados – aço VF800

	Matriz	Carboneto “maior”	Carboneto “menor”
Amostra 1	Fe, O, Cr, Si e S	Fe, C, Cr, V e S	Fe, C, Cr, V, N, S e Si
Amostra 2	Fe, Cr, O, Cr, Si e S	Fe, C, O, Cr, V e S	Fe, C, Cr, V, e S
Amostra 3	Fe, C, O, Cr e Si	Fe, C, Cr, V e S	Fe, C, Cr, V, N e S
Amostra 4	Fe, C, O, Cr e Si	Fe, C, Cr, V e S	Fe, C, Cr, V, e S

Fonte: Próprio autor

O resultado da análise de EDS no carboneto primário e secundário realizada por Das, Dutta e Ray (2010) para o aço convencional AISI D2, foi parecido com os obtidos nesse trabalho, porém com a diferença que eles detectaram também a presença de molibdênio, e não detectaram a presença de enxofre.

Não foi observada nenhuma diferença significativa entre os elementos presentes na matriz e nos carbonetos das 4 amostras do mesmo aço, o que já era de se esperar.

Foi detectada a existência nitrogênio na matriz e em alguns carbonetos menores dos aços VD2, QCM8 e VF800, conforme se verifica nas tabelas 16, 17 e 19. Não foi encontrada na literatura algo parecido, mas um fato que poderia justificar isso seria a presença remanescente de HNO₃ na superfície desses aços, proveniente do reagente Nital, usado no ataque químico.

Já a presença de oxigênio, detectado em todos os aços, pode estar relacionada ao processo de fabricação ou à oxidação na superfície das amostras, tendo em vista que todas elas foram preparadas cerca de uma semana antes da condução das análises de EDS.

Observa-se que o enxofre está presente em todos os aços, tanto na matriz quanto nos carbonetos, com exceção do VD2 em que está presente apenas nos carbonetos. O enxofre é considerado uma impureza para os aços, sendo encontrado basicamente na forma de sulfetos nos contornos de grão (SILVA, 1998). Devido à sua alta solubilidade no ferro líquido, o

enxofre é, na maioria das vezes, proveniente do próprio processo de produção do aço e, associado ou não ao oxigênio, contribui para a fragilidade a quente do aço (essa propriedade possa ser melhorada com a adição de manganês). Ressalta-se, por fim, que a presença de enxofre pode ser associada a algum tipo de contaminação superior das amostras anterior à realização dos experimentos.

4.5 Análise geral dos resultados

A grande discrepância observada entre os teores obtidos na análise química e a folha de dados dos aços ocorreu principalmente à não diluição total dos aços no solvente utilizado, sendo que o aço VD2 foi o que mais deixou resíduos e o que mais houve variação. Apesar disso, não há dúvidas de que os aços analisados foram de fato os reportados. Para uma maior acuracidade nessa análise outros solventes como H_3PO_4 e H_2SO_4 poderiam ser usados na dissolução convencional ou poderia-se valer da dissolução eletrolítica. Como apenas se conhece os teores nominais dos aços em questão, não se pôde avaliar se os teores encontrados na análise química estão dentro da faixa de trabalho. Alguns elementos como: Al, Ti, Ni e Cu, não constados nas folhas de dados, mas detectados na análise química, possuíam teores abaixo de 0,1%, sendo por isso, considerados desprezíveis para alguns fabricantes.

Levando em conta o desvio padrão, as rugosidades superficiais dos quatro aços após o uso foram semelhantes. Sabendo-se que a rugosidade inicial de todos era igual, isso sugere que todos os cilindros desgastaram similarmente durante o uso, o que de fato confere, tendo em vista a dureza média semelhante obtida em todos os aços. Desconsiderando o desvio padrão, o aço Sleipner foi o que obteve menor rugosidade média, o que mostra que tendo em vista apenas essa propriedade, esse é o aço que tem menor probabilidade de falhar por fadiga. Em contrapartida, o VF800 foi o que apresentou maior rugosidade média, tendo, portanto, menor resistência à fadiga.

Como já era esperado, a dureza medida nas quatro amostras de cada aço não diminuiu com o aumento da distância da superfície, pois o alto teor de alguns elementos de liga como Mn, Mo, Cr, Si, Ni e V, em todos os aços, aumenta a profundidade de endurecimento, permitindo a têmpera total. O aço Sleipner foi o que mostrou um perfil de dureza mais homogêneo dentre os demais, fato justificado pela sua distribuição uniforme tanto de “carbonetos maiores” quanto de “carbonetos menores”. Enquanto isso, o aço VF800 foi o que apresentou o perfil de dureza mais heterogêneo, devido principalmente à sua distribuição desigual de “carbonetos maiores”. Foi recomendado ao fornecedor do tratamento térmico que fizesse o tratamento de modo a atingir a dureza de 61-62HRC em todos os aços, porém após a

medição, foi observado que de um modo geral as durezas médias se encontravam cerca de 5% menores. Esse fato pode ser devido a alguma alteração feita no processo de tratamento térmico recomendado pelo fabricante ou devido a tolerâncias cabíveis ao processo. O fato é que para o uso em cilindros de laminação a frio, uma variação de 5% na dureza não altera significativamente as propriedades do aço de modo a comprometer a aplicação.

Em relação à microestrutura, o aço VD2 foi o que apresentou maior número de carbonetos como um todo, fato esperado devido ao seu maior teor de elementos de liga. O seu alto teor de Cr também propiciou a formação de muitos carbonetos do tipo M_7C_3 . Os “carbonetos maiores”, identificados como sendo MC, M_7C_3 e M_2C , apresentaram-se distribuídos heterogeneamente, enquanto os menores, identificados como $M_{23}C_6$ mostraram-se distribuídos mais homogeneamente, mas não tanto quanto os verificados nos aços QCM8, Sleipner e VF800. Além disso, os carbonetos $M_{23}C_6$ exibiram tamanho semelhante aos mesmos carbonetos no aço Sleipner, mas maior do que os do aço QCM8 e VF800. Dentre todos os aços, o VD2 foi o que apresentou mais carbonetos do tipo MC, relatados na literatura como sendo os mais duros. Por isso, mesmo com a mesma dureza, o aço VD2 tende a ter maior resistência ao desgaste do que os demais aços. Porém, o fato de terem carbonetos grandes, aglomerados em regiões interdendríticas e distribuídos não uniformemente, pode fazer com que sejam concentradores de tensão e por isso, levar a nucleação de trincas. Além do mais, os carbonetos M_7C_3 presentes em larga escala no aço VD2 são tidos como frágeis. Outro fato importante é que como a temperatura de revenimento desse aço é relativamente baixa (190°C), há uma maior probabilidade desse aço conter mais austenita retida e ter menor tenacidade, podendo por isso, apresentar baixa vida útil quando usado nos rolos de laminação.

Tanto o aço QCM8 quanto o VF800 apresentaram microestrutura bastante semelhante, com “carbonetos maiores” do tipo MC, distribuídos não uniformemente e “carbonetos menores” do tipo $M_{23}C_6$ finos e homogeneamente distribuídos pela matriz martensítica. Carbonetos mais finos podem indicar que a taxa de solidificação desses dois aços tenha sido maior do que a dos demais. Já no aço Sleipner foram identificados “carbonetos maiores” MC e M_7C_3 , sendo esse último em bem menor quantidade do que o observado no aço VD2, e “carbonetos menores” $M_{23}C_6$. Foi observado que tanto os “carbonetos maiores” quanto os “menores” estavam distribuídos homogeneamente nas 4 amostras. Não houve diferença microestrutural significativa entre as 4 amostras de cada um dos aços, o que já era esperado devido à têmpera total e à uniformidade no perfil de durezas. Ressalta-se que nos aços Sleipner e VF800 foi identificado um tipo de carboneto não relatado na literatura, na forma de “cacho de uva” e com coloração mais clara que os demais. A identificação dos carbonetos

citados anteriormente foi baseada apenas na sua morfologia, composição química e localização. Para uma identificação mais precisa dos seus tipos e quantidades seria necessária a realização de Difração de Raios-X.

Na análise de EDS não houve diferença significativa dos elementos identificados na matriz e nos carbonetos das 4 amostras em nenhum dos aços. Em alguns aços como VD2, QCM8 e VF800 foi identificado nitrogênio, o que muito provavelmente está relacionado ao HNO_3 do Nital, remanescente nas amostras. Já a identificação de oxigênio em todos os aços pode ser devido ao processo de fabricação na aciaria ou devido à ocorrência de oxidação na superfície das amostras, visto que a preparação das amostras foi bem anterior à realização das análises. Também foi identificado enxofre na grande maioria das amostras, impureza muito provavelmente obtida no processo de fabricação.

Sabe-se que várias podem ser as causas de falha em cilindros de laminação a frio de perfis, mas a principal delas, é sem dúvida, a falha por fadiga. Isso acontece tanto pela concentração de tensão residual na região do perfil do rolo (em geral devido às quinas para moldarem o arame), quanto pelas tensões cíclicas de tensão e compressão a que os cilindros são submetidos. Para aumentar a vida em fadiga dos rolos, pode-se criar tensões de compressão na superfície dos mesmos através de um tratamento termoquímico de nitretação, ou por jateamento, por exemplo. Uma outra alternativa não só para aumentar a resistência à fadiga, mas também para otimizar as demais propriedades de um aço como: resistência ao desgaste, resistência ao impacto, resistência ao lascamento, etc, é uma microestrutura que proporcione máxima dureza aliada a máxima tenacidade. De acordo com a literatura, essa microestrutura em aços ferramenta é conseguida com carbonetos finos e homogeneamente espalhados pela matriz martensítica (ideal: metalurgia do pó), pois a nucleação de trincas muitas vezes se dá em carbonetos grandes e/ou em inclusões/poros (não foi constatado na microestrutura de nenhum dos aços, o que já era esperado por todos se tratarem de aços forjados). Nesse ponto de vista, o aço QCM8, dentre todos os outros, seria o mais indicado para a aplicação em rolos de laminação a frio de perfis, pois juntamente com o VF800 foi o que apresentou maior refinamento e distribuição dos carbonetos. Em comparação ao VF800, o QCM8 apresentou menor rugosidade média, o que garante sua maior vida em fadiga, e maior homogeneidade no perfil de durezas, o que permite a manutenção das propriedades com a recuperação (diminuição do diâmetro) dos cilindros de laminação. O aço Sleipner também mostrou ter boas propriedades, mas para a aplicação em questão, não seria o melhor. Já o VD2, de acordo com as análises, seria o pior para a aplicação devido as circunstâncias relatadas anteriormente.

5 CONCLUSÃO

A realização deste trabalho permitiu concluir que:

- A análise química revelou a presença de elementos como Ti, Ni e Cu em todos os aços analisados e de Al nos aços Sleipner e VF800, elementos não reportados na folha de dados dos fabricantes.
- Em todos os aços estudados, verificou-se uma variação significativa entre os teores obtidos na análise química e os contidos na folha de especificação do fabricante, sendo que o aço VD2 foi o que mostrou maior variação em termos percentuais.
- A rugosidade média de todos os aços analisados aumentou após o uso dos cilindros.
- Os aços VF800 e Sleipner foram os que apresentaram maior e menor rugosidade média, respectivamente.
- De modo geral, a dureza manteve-se relativamente constante com o aumento da distância da superfície em todos os aços.
- O aço Sleipner foi o que apresentou maior homogeneidade no perfil de dureza, enquanto o aço VF800 foi o que mostrou maior heterogeneidade.
- A dureza média dos aços analisados estava cerca de 5% menor do que a dureza recomendada para o tratamento térmico dos mesmos.
- O aço VD2 foi o aço que apresentou maior tamanho e quantidade de carbonetos.
- O carboneto do tipo M_2C foi encontrado apenas no aço VD2.
- Os aços QCM8 e VF800 mostraram uma microestrutura bastante parecida, com os mesmos tipos e tamanhos de carbonetos (menores que nos demais aços).
- O Sleipner foi o aço que mostrou maior homogeneidade na distribuição dos carbonetos.
- Em nenhum dos aços foi observada variação significativa na distribuição de carbonetos entre as quatro amostras de cada aço.
- Na análise de EDS foi identificada a presença de N nos aços VD2, QCM8 e VF800 e de S e O em todos os aços.
- Dentre todos os aços estudados, constatou-se que o QCM8 seria o mais indicado para o uso em cilindros de laminação a frio de perfis, devido a suas propriedades mais favoráveis para esse tipo de aplicação.

REFERÊNCIAS

- Abpora. Disponível em: <<http://varian.avrora-lab.ru/spectro/Issue.html>>. Acesso em: 28 abr. 2014
- Aços para trabalho a frio:VD2. Disponível em: <http://www.villaresmetals.com.br/portuguese/files/FT_13_VD2.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2014.
- Aços para trabalho a frio:VF800AT. Disponível em <http://www.villaresmetals.com.br/portuguese/files/FT_13_VF800AT.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2014.
- A indústria do aço no Brasil. **Relatório de sustentabilidade 2013**, Rio de Janeiro, 2013, p. 16-17. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/biblioteca/Relatorio_Sustentabilidade_2013_web_v02.pdf>. Acesso em: 31 dez. 2013.
- BADISH, E.; MITTERER, C. Abrasive wear of high speed steels: Influence of abrasive particles and primary carbides on wear resistance. **International Tribology**, v. 36, p. 765-770, 2003.
- BOLTERI, A. A. Aulas de laminação. [S.I.], 2013. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAA4uwAH/aulas-laminacao?part=2>>. Acesso em: 27 dez. 2013.
- BOURITHIS, L.; PAPADIMITRIOU, G. D.; SIDERIS, J. Comparison of wear properties of tool steels AISI D2 and O1 with the same hardness. **Tribology International**, v. 39, p. 479-489, 2006.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7. ed. ampl. e rev. São Paulo: ABM, 2012. 599,179,180 p.
- DAS, D.; DUTTA, A. K.; RAY, K. K. Sub-zero treatments of AISI D2 steel: Part I. Microstructure and hardness. **Materials Science and Engineering A**, v. 527, p. 2182-2193, 2010.
- DAS, D. et al. Influence of sub-zero treatments on fracture toughness of AISI D2 steel. **Materials Science and Engineering A**, v. 528, p. 589-603, 2010.
- DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica**. Tradução Antônio Sérgio de Sousa e Silva et al. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 1981. 653 p.
- FILHO, E. B. et al. **Conformação plástica dos metais**. 6. ed. Campinas: [s.n.], 2011. 254 p. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/CONFORMACAOPLASTICADOSMETAIS.pdf>>.
- GERVASIO, A. P. G. Dissolução eletrolítica para a determinação de elementos de liga em aço ferramenta por ICP-AES. **Química Nova**, v. 23, n. 4, p. 482-486, 2000.

HELMAN, H.; CETLIN, P. R. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais**. 2. Ed. Belo Horizonte: QFCO, 1993. 170 p.

HETZNER, D. W.; GEERTRUYDEN, W. V. Crystallography and metallography of carbides in high alloy steels. **Materials Characterization**, v. 59, p. 825-841, 2008.

MORAIS, W. A.; JÚNIOR, H. D. S. **Fadiga nos aços estruturais**. Disponível em: <<http://www.revistadoaco.com.br/fadiga-nos-acos-estruturais/>>. Acesso em: 14 jun. 2014.

PIPPEL, E. et al. Microstructure and nanochemistry of carbide precipitates in high-speed steel S 6-5-2-5. **Materials Characterization**, v. 43, p. 41-55, 1999.

QCM8. Disponível em:
<http://www.grupoalltech.com.br/2012/userfiles/produtos_steel/2981_1341317620.pdf>.
Acesso em: 26 abr. 2014.

RAUTER, R. O. **Aços ferramentas: seleção, tratamentos térmicos, pesquisa de defeitos**. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos, 1974. 254 p.

REBELLO, Y. C. P. As seções estruturais e suas aplicações. **Sistemas estruturais em aço na arquitetura**. Rio de Janeiro, n. 3, 2009. Disponível em:
<http://www.cursoscbca.com.br/moodle/arquivos/pdfs/Apostila_Sistemas_Estruturais/Apostila_Modulo_3.pdf>. Acesso em: 31 dez. 2013.

RONG, W. et al. The role of alloy composition in the precipitation behavior of high speed steels. **Acta Metall.Mater**, v. 40, p. 1727-1738, 1992.

SILVA, A. L. V. C.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2010. 646 p.

SILVA, A. L. V. C. Enxofre e dessulfuração. Disponível em:
<<http://www.equilibriumtrix.net/parte9.pdf>>. Acesso em: 27 jun. 2014.

Sleipner: aço ferramenta para trabalho a frio. Disponível em:
<<http://www.uddeholm.com.br/br/1485.htm>>. Acesso em: 26 abr. 2014.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. Tradução AMGH Editora Ltda. 5. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2012. 210 p.

Supply QCM8 die steel. Disponível em:
<<http://dzx504271907.en.b2b168.com/shop/supply/20551863.html>>. Acesso em 04 jun. 2014.

Ufficio Tecnico. Disponível em: <<http://www.arcostruzionimeccaniche.it/ufficio-tecnico>>.
Acesso em: 28 abr. 2014.

VITRY, V. et al. Microstructure of two centrifugal cast high speed steels for hot strip mills applications. **Materials and Design**, v. 34, p. 372-378, 2012.

TORKAMANI, H; RAYGAN, S.; RASSIZADEHGHANI, J. Comparing microstructure and mechanical properties of AISI D2 steel after bright hardening and oil quenching. **Materials and Design**, v. 54, p. 1049-1055, 2014.