



Universidade de Aveiro
2016

Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica

Carina Fidalgo Carlos

Caracterização e remoção da calamina do aço laminado



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica

2016

Carina Fidalgo Carlos **Caracterização e remoção da calamina do aço laminado**

Projeto apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestrado em Engenharia de Materiais, realizada sob orientação científica de Rui Ramos Ferreira e Silva, Professor Associado, e Filipe José Alves de Oliveira, Equiparado a Investigador Principal, do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro.

O júri,

Presidente

Prof. Doutor Augusto Luís Barros Lopes
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Vogais

Prof. Doutor Rui Ramos Ferreira e Silva
Professor Associado da Universidade de Aveiro (orientador)

Prof. Doutora Gabriela Tamara Vincze
Professora Auxiliar Convidada da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

À Universidade de Aveiro e ao programa de Mestrado em Engenharia de Materiais.

Aos professores Rui Silva e Filipe Oliveira pela dedicação, compromisso e conhecimento transmitido na orientação no projeto de mestrado.

Ao engenheiro António José Vidal, Diretor Geral da Plafesa, pela dedicação e disponibilidade em colaborar com o projeto de mestrado.

Ao investigador Miguel Ângelo pelo apoio prestado quando solicitado pelo aluno ao longo da atividade laboral.

Aos professores Florinda Costa e Nuno Ferreira por disponibilizarem o uso do laser Nd:YAG (1060 nm) para o trabalho de investigação.

Aos engenheiros Marta Cardoso, Tiago Silva, Ana Ribeiro e Artur Sarabando pelo auxílio nas atividades envolvendo a microscopia eletrónica de varrimento (SEM), distribuição granulométrica de partículas e difração de raios-X (DRX).

E a todos que, diretamente ou indiretamente, participaram na realização deste trabalho.

Palavras-Chave

Aço-carbono, chapa laminada, oxidação, calamina, decapagem

Resumo

O trabalho de projeto foi desenvolvido em parceria com a empresa Plafesa com o intuito de comparar processos não-químicos de remoção da calamina de laminagem da superfície de chapas de aço-carbono. De entre as várias técnicas possíveis, o estudo incidiu em processos de decapagem mecânica (erosiva e abrasiva) e física (ablação a laser), atualmente procurados dado o seu baixo impacto ambiental. Os métodos utilizados foram os seguintes: jateamento erosivo por via seca, jateamento erosivo por via húmida, jateamento com água a alta pressão, escovagem rotativa com escovas ou lamelas de manta abrasiva e remoção por ablação a laser. Para esta investigação foi feita a caracterização da calamina e da superfície das chapas de aço-carbono, recorrendo a técnicas como: microscopia ótica, eletrónica de varrimento com análise química (SEM-EDS), difração de raios-X (DRX) e perfilometria ótica 3D.

Todas as técnicas testadas no trabalho mostram ser capazes de remover a calamina, havendo algumas diferenças no grau de remoção, aspeto e rugosidade final da superfície metálica. A técnica de jateamento erosivo por via seca aumenta a rugosidade ($S_a = 4,3-4,7 \mu\text{m}$) relativamente à original ($S_a = 2,1-2,4 \mu\text{m}$) e leva à formação de resíduos de agente erosivo (alumina ou carboneto de silício) que ficam incrustados no aço. As técnicas de jateamento com água a alta pressão e jateamento erosivo por via húmida provocam uma agressão significativa da superfície da chapa ($S_a = 16,5-19,7 \mu\text{m}$). O método de escovagem rotativa é a técnica que proporciona melhor acabamento superficial, com valores mínimos de rugosidade ($S_a = 0,6-1,8 \mu\text{m}$). A ablação laser garante igualmente a remoção de calamina e valores de rugosidade reduzidos ($S_a = 2,0 \mu\text{m}$) mas o controlo dos parâmetros do processo é crítico, para não ocorrerem fenómenos de sobrefusão e evitar a marcação da superfície.

Keywords

Carbon steel, hot rolled sheet, oxidation, oxide scale, descaling processes

Abstract

This project was developed in partnership with Plafesa company in order to compare non-chemical processes for descaling of hot rolled steel sheets. Among the various possible techniques, the study focused on mechanical stripping processes (erosive and abrasive) and physical (laser ablation), currently under scrutiny because of their low environmental impact. The methods used were: dry erosive blasting, wet erosive blasting, high pressure water blasting, brushing with rotating brushes or abrasive lamellae blankets and laser ablation removal. For this investigation the oxide scale and the surface of the carbon steel plates were characterized using techniques such as optical microscopy, scanning electron microscopy with chemical analysis (SEM-EDS), X-ray diffraction (XRD) and 3D optical profilometry.

All of the techniques tested in this work were able to remove the oxide scales, although with some differences in the degree of removal, appearance and final roughness of the metal surface. The dry erosive blasting technique increases the surface roughness ($S_a = 4.3$ to $4.7 \mu\text{m}$) relatively to the original one ($S_a = 2.1$ - $2.4 \mu\text{m}$) and leads to the embedding of the erodent (alumina or silicon carbide) into the steel. The high pressure water blasting and erosive wet blasting techniques cause significant damage to the plate surface ($S_a = 16.5$ to $19.7 \mu\text{m}$). The rotating brush method is the technique that provides better surface finishing with minimal roughness values ($S_a = 0.6$ - $1.8 \mu\text{m}$). Laser ablation also ensures the removal of scale and the achievement of reduced roughness values ($S_a = 2.0 \mu\text{m}$). The control of the process parameters is critical to prevent over fusion phenomena and additional markings to the surface.

Conteúdo

Capítulo 1

Introdução	1
------------------	---

Capítulo 2

Estado da Arte	3
2.1. Definição de Aço-Carbono	3
2.2. Produção de Chapas de Aço-Carbono por Laminagem a Quente	4
2.3. Calamina como um Subproduto de Laminagem a Quente	5
2.3.1. Constituição e Propriedades da Calamina	5
2.3.2. Morfologia da Calamina	6
2.3.3. Influência dos Elementos de Liga	7
2.3.4. Cinética de Crescimento de Calamina	8
2.3.5. Grau de Oxidação	9
2.4. Métodos de Eliminação da Calamina	10
2.4.1. Processos de Remoção	10
2.4.2. Processos Mecânicos	11
2.4.2.1. Jateamento Erosivo por Via Seca.....	11
2.4.2.2. Jateamento Erosivo por Via Húmida	12
2.4.2.3. Jateamento com Água a Alta Pressão	15
2.4.2.4. Escovas Rotativas	16
2.4.3. Processos Físicos	16
2.4.3.1. Laser	16

Capítulo 3

Metodologia Experimental	19
3.1. Técnicas de Caracterização dos Materiais Antes e Após Processos de Decapagem	19
3.1.1. Caracterização do Pó	19
3.1.2. Caracterização das Chapas S235 JR e S355 JR Antes e Após Processos de Decapagem	19
3.2. Processos de Decapagem	20
3.2.1. Jateamento Erosivo por Via Seca	20

3.2.2.	Jateamento com Água a Alta Pressão e Jateamento Erosivo por Via Húmida	21
3.2.3.	Remoção com Escovas Rotativas	23
3.2.4.	Ablação a Laser	25
Capítulo 4		
Resultados e Discussão		
4.1.	Caracterização da Calamina Libertada das Chapas	27
4.2.	Caracterização da Calamina nas Chapas S235 JR e S355 JR	28
4.3.	Caracterização das Chapas Após o Jateamento Erosivo por Via Seca	32
4.3.1.	Agente Erosivo 50 μm Al_2O_3	32
4.3.2.	Agente Erosivo 50 μm SiC	37
4.4.	Caracterização das Chapas Após o Jateamento com Água a Alta Pressão e Jateamento Erosivo por Via Húmida	42
4.5.	Caracterização das Chapas Após o Escovamento	50
4.5.1.	Lamela de Manta Abrasiva de Al_2O_3	50
4.5.2.	Escova Abrasiva de Alumina 125 μm	57
4.5.3.	Escova Abrasiva de Alumina 80 μm	64
4.6.	Caracterização das Chapas Após Ablação a Laser	69
4.7.	Condições de Decapagem da Calamina para cada Técnica	75
Conclusões		
Bibliografia		

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Quantidade máxima em percentagem em peso dos elementos de liga num aço-carbono. ^[1]	3
Tabela 2.2: Designação dos aços laminados a quente, segundo a norma EN 10025-1:2004. ^[1,6]	5
Tabela 2.3: Características e propriedades das 3 camadas de óxido. ^[9,10]	5
Tabela 2.4: Graus de oxidação e sua descrição. ^[22,23]	9
Tabela 2.5: Técnicas de decapagem de acordo com a espessura da calamina. ^[34]	10
Tabela 2.6: Guia de Materiais Erosivos. ^[31]	12
Tabela 3.1: Composição química das chapas S235 JR e S355 JR.	19
Tabela 3.2: Condições de jateamento erosivo para Al ₂ O ₃ e SiC.	21
Tabela 3.3: Condições de jateamento com água a alta pressão e jateamento erosivo por via húmida para a chapa S235 JR.	22
Tabela 3.4: Condições de escovagem utilizadas para as escovas de nylon abrasivo e lamela de manta abrasiva.	24
Tabela 3.5: Parâmetros utilizados com o equipamento a laser.	26
Tabela 4.1: Parâmetros de rugosidade superficial das chapas S235 JR e S355 JR antes dos processos de decapagem mecânica e física.	31
Tabela 4.2: Parâmetros de rugosidade superficial das chapas S235 JR e S355 JR após decapagem por jateamento erosivo com partículas de alumina.	36
Tabela 4.3: Parâmetros de rugosidade superficial das chapas S235 JR e S355 JR após decapagem por jateamento erosivo com partículas de carboneto de silício.	41
Tabela 4.4: Parâmetros de rugosidade superficial da chapa S235 JR correspondentes aos perfis de rugosidade da Fig. 4.22 à 4.24.	49

Tabela 4.5: Parâmetros de rugosidade superficial das chapas S235 JR e S355 JR correspondentes às Figs. 4.29 e 4.30.	55
Tabela 4.6: Parâmetros de rugosidade superficial da chapa S235 JR correspondentes à Fig. 4.31.	56
Tabela 4.7: Parâmetros de rugosidade superficial das chapas S235 JR e S355 JR correspondentes às superfícies das Figs. 4.37e 4.38.	63
Tabela 4.8: Parâmetros de rugosidade superficial das chapas S235 JR e S355 JR correspondentes aos perfis da Fig. 4.42 e 4.43.	68
Tabela 4.9: Parâmetros de rugosidade superficial das chapas S235 JR e S355 JR correspondentes às Figs. 4.48 e 4.49.	73
Tabela 4.10: Melhores condições de decapagem para as várias técnicas testadas.	75
Tabela 4.11: Valores de Sa e grau de remoção/aspecto superficial das chapas S235 JR e S355 JR nas melhores condições de trabalho.	75

Lista de Imagens

Fig. 2.1: (a) Fracção molar de 3 óxidos de ferro em função da temperatura e (b) diagrama de transformação isotérmica da camada de FeO formada termicamente num aço macio a 900°C em ar. ^[11,18]	7
Fig. 2.2: Crescimento da calamina na superfície de um aço de baixo carbono em arrefecimento contínuo. ^[19]	8
Fig. 2.3: (a) Ilustração esquemática de máquina de jateamento de 4 turbinas (b) exposição da peça de trabalho durante a decapem. ^[32]	11
Fig. 2.4: Configuração ideal de “slurry blasters” numa chapa de aço. ^[27]	13
Fig. 2.5: EDS da superfície do aço (a) antes do “slurry blasters” e (b) depois do “slurry blasters”. ^[27]	14
Fig. 2.6: (a) Arranjo típico do bico com a lista de termos e símbolos e (b) proposta de uma instalação típica de decapagem realizada por meio do programade Lechler Descale. ^[13]	15
Fig. 2.7: (a) Impacto de pulverização para diferentes pressões e (b) impacto de pulverização para diferentes distâncias de pulverização. ^[34]	16
Fig. 2.8: Diagrama esquemático da configuração experimental. ^[36]	17
Fig. 2.9: Microestruturas obtidas por SEM da superfície (a) original, (b) tratada a laser de fibra de alta potência com 2 e (c) 20 passagem. As barras de escala das imagens são do mesmo tamanho. ^[36]	18
Fig. 2.10: Temperatura da superfície após o tratamento com laser. ^[36]	18
Fig. 3.1: Equipamento de jato erosivo utilizado no trabalho.	21
Fig. 3.2: Equipamento de corte por jato de água com agente erosivo existente na ESAN.	22
Fig. 3.3: Máquina de escovas rotativas adaptado utilizado no trabalho.	23

Fig. 3.4: Escovas de nylon abrasivo (a) 80 μm Al_2O_3 e (b) 125 μm Al_2O_3 e (c) lamela de manta abrasiva de 150 μm Al_2O_3 , vistas de lado e topo.	24
Fig. 3.5: Laser Nd-YAG (1064 nm).	25
Fig. 4.1: Difractogramas de raios-X de calamina proveniente (a) de várias qualidades de chapas de aço-carbono e da chapa (b) S235 JR e (c) S355 JR.	27
Fig. 4.2: Distribuição granulométrica das partículas da calamina proveniente de várias chapas.	28
Fig. 4.3: Imagens obtidas por lupa da superfície das chapas S235 JR (esquerda) e S355 JR (direita) antes dos processos de decapagem mecânica e física.	28
Fig. 4.4: Espectros EDS das chapas S235 JR (esquerda) e J355 JR (direita) antes dos processos de decapagem mecânica e física.	29
Fig. 4.5: Microestruturas obtidas por OM em secção das chapas S235 JR (esquerda) e S355 JR (direita).	30
Fig. 4.6: Microestruturas obtidas por SEM em cross-section das chapas S235 JR (esquerda) e S355 JR (direita).	30
Fig. 4.7: Imagens obtidas por perfilometria ótica 3D das chapas S235 JR (cima) e S355 JR (baixo).	31
Fig. 4.8: Imagens obtidas por lupa das áreas decapadas durante 30 s das chapas S235 JR (cima) e S355 JR (baixo) a 2,80 bar com fluxo de material erosivo (Al_2O_3) de 5, 4 e 3 g/min.	32
Fig. 4.9: Imagens obtidas por lupa das áreas decapadas durante 15 s das chapas S235 JR (cima) e S355 JR (baixo) a 2,80 bar com fluxo de material erosivo (Al_2O_3) de 5, 4 e 3 g/min.	33
Fig. 4.10: Análise de espectro EDS das chapas S235 JR e S355 JR após um jateamento (Al_2O_3) de 15 e 30 s.	34

Fig. 4.11: Imagens obtidas por perfilometria ótica 3D da chapa S235 JR após um jateamento (Al_2O_3) de 15 s (cima) e 30 s (baixo) com um fluxo de 3 g/min.	35
Fig. 4.12: Imagens obtidas por perfilometria ótica 3D da chapa S355 JR após um jateamento (Al_2O_3) de 15 s (cima) e 30 s (baixo) com um fluxo de 3 g/min.	36
Fig. 4.13: Imagens obtidas por lupa das áreas decapadas durante 30 s das chapas S235 JR (cima) e S355 JR (baixo) a 2,80 bar com fluxo de material erosivo (SiC) de 5, 4 e 3 g/min.	37
Fig. 4.14: Imagens obtidas por lupa das áreas decapadas durante 15 s das chapas S235 JR (cima) e S355 JR (baixo) a 2,80 bar com fluxo de material erosivo (SiC) de 5, 4 e 3 g/min.	38
Fig. 4.15: Espectros EDS das chapas S235 JR e S355 JR após um jateamento (SiC) de 15 s e 30 s, com um fluxo de 3 g/min.	39
Fig. 4.16: Imagens obtidas por perfilometria ótica 3D da chapa S235 JR após um jateamento (SiC) de 15 s (cima) e 30 s (baixo) com um fluxo de 3 g/min.	40
Fig. 4.17: Imagens obtidas por perfilometria 3D da chapa S355 JR após um jateamento (SiC) de 15 s (cima) e 30 s (baixo) com um fluxo de 3 g/min.	41
Fig. 4.18: Imagens obtidas por lupa das áreas da chapa S235 JR decapadas com jato de água s/erodente a 380 bar, com velocidade de avanço do bico de 15 m/min, localizado a diferentes alturas da chapa.	42
Fig. 4.19: Imagens obtidas por lupa das áreas decapadas da chapa S235 JR s/erodente, para uma distância bico-jato de 4 mm.	43
Fig. 4.20: Imagens obtidas por lupa das áreas decapadas da chapa S235 JR após um jateamento c/erodente, a 380 bar de pressão de água e 15 m/min de velocidade de avanço do bico.	44
Fig. 4.21: Espectro EDS da chapa S235 JR após um jateamento c/erosivo, a 380 bar de pressão de água, 15 m/min de velocidade de avanço do bico, distância bico-chapa de 164 mm e 250 g/min de fluxo erosivo.	45

Fig. 4.22: Imagens obtidas por perfilometria 3D da chapa S235 JR após um jateamento húmido s/erodente a 380 bar e 15 m/min de velocidade de avanço do bico, relativas às condições A (distância bico-chapa de 164 mm), B (144 mm) e C (124 mm).	46
Fig. 4.23: Imagens obtidas por perfilometria 3D da chapa S235 JR após um jateamento húmido s/erodente a 380 bar e distância bico-chapa de mm, relativas às condições H (velocidade de avanço do bico de 5 m/min), I (1 m/min) e J (0,1 m/min).	47
Fig. 4.24: Imagens obtidas por perfilometria 3D da chapa S235 JR após um jateamento c/erodente relativas às condições M (distância bico-chapa 164 mm; fluxo de erodente de 250 g/min), N (164 mm; 150 g/min) e O (4 mm; 250 g/min).	48
Fig. 4.25: Imagens obtidas por lupa das superfícies escovadas durante 30 s das chapas S235 JR (cima) e S355 JR (baixo) a velocidades de 4500, 6000 e 7500 RPM.	50
Fig. 4.26: Imagens obtidas por lupa das superfícies tratadas durante 15 s das chapas S235 JR (cima) e S355 JR (baixo) a velocidades de 4500, 6000 e 7500 RPM.	51
Fig. 4.27: Espectros EDS da chapa S235 JR após uma escovagem durante 30 s a uma velocidade de 4500 e 6000 RPM e 15 s a uma velocidade de 7500 RPM.	52
Fig. 4.28: Espectros EDS da chapa S355 JR após uma escovagem durante 30 s a uma velocidade de 4500 RPM e 15 s a uma velocidade de 6000 e 7500 RPM.	53
Fig. 4.29: Imagens obtidas por perfilometria 3D das superfícies tratadas durante 15 s da chapa S235 JR e S355 JR a velocidades de 6000 RPM.	54
Fig. 4.30: Imagens obtidas por perfilometria 3D das superfícies tratadas durante 15 s da chapa S235 JR e S355 JR a velocidades de 7500 RPM.	55
Fig. 4.31: Imagens obtidas por perfilometria ótica 3D das superfícies tratadas durante 5 e 30 s da chapa S235 JR a uma velocidade de 7500 RPM.	56
Fig. 4.32: Imagens obtidas por lupa das superfícies tratadas durante 30 s das chapas S235 JR (cima) e S355 JR (baixo) a velocidades de 4500 e 6000 RPM.	57
Fig. 4.33: Imagens obtidas por lupa das superfícies tratadas durante 15 s das chapas S235 JR (cima) e S355 JR (baixo) a velocidades de 4500, 6000 e 7500 RPM.	58

Fig. 4.34: Imagens obtidas por lupa das superfícies tratadas durante 5 s das chapas S235 JR (cima) e S355 JR (baixo) a velocidades de 6000 e 7500 RPM.	59
Fig. 4.35: Análise de espectro EDS da chapa S235 JR após uma escovagem durante 15 s a uma velocidade de 4500 e 6000 RPM e 5 s a uma velocidade de e 7500 RPM.	60
Fig. 4.36: Análise de espectro EDS da chapa S355 JR após uma escovagem durante 15 s a uma velocidade de 4500 e 6000 RPM e 5 s a uma velocidade de e 7500 RPM.	61
Fig. 4.37: Imagens obtidas por perfilometria ótica 3D das superfícies tratadas durante 15 s da chapa S235 JR a velocidades de 4500, 6000 e 7500 RPM.	62
Fig. 4.38: Imagens obtidas por perfilometria ótica 3D das superfícies tratadas durante 15 s da chapa S355 JR a velocidades de 4500, 6000 e 7500 RPM.	63
Fig. 4.39: Imagens obtidas por lupa das superfícies tratadas durante 30 s das chapas S235 JR (cima) e S355 JR (baixo) a velocidades de 4500 e 6000 RPM.	64
Fig. 4.40 Imagens obtidas por lupa das superfícies tratadas durante 15 s das chapas S235 JR (cima) e S355 JR (baixo) a velocidades de 4500 e 6000 RPM.	65
Fig. 4.41: Análise de espectro EDS das chapas S235 JR e S355 JR após uma escovagem durante 30 s a uma velocidade de 4500 RPM e 15s a 6000 RPM.	66
Fig. 4.42: Imagens obtidas por perfilometria ótica 3D das superfícies tratadas da chapa S235 JR durante 15 e 30 s a uma velocidade de 6000 RPM.	67
Fig. 4.43: Imagens obtidas por perfilometria ótica 3D das superfícies tratadas da chapa S355 JR durante 15 e 30 s a uma velocidade de 6000 RPM.	68
Fig. 4.44: Imagens obtidas por lupa das superfícies tratadas a laser das chapas S235 JR (esquerda) e S355 JR (direita), com 5 passagens e uma velocidade de feixe de 1000 mm/s. .	69
Fig. 4.45: Imagens obtidas por lupa das superfícies tratadas a laser da chapa S235 JR com 1 passagem, a uma frequência de 20 KHz e velocidade de feixe de 1000 mm/s.	70
Fig. 4.46: Imagens obtidas por lupa das superfícies tratadas a laser da chapa S355 JR com 1 passagem, a uma frequência de 20 KHz e velocidade de feixe de 1000 mm/s.	70

Fig. 4.47: Análise de espectro EDS das chapas S235 JR e S355 JR tratadas a laser nas condições da Fig. 4.44.	71
Fig. 4.48: Imagens obtidas por perfilometria ótica 3D das superfícies tratadas da chapa S235 JR nas condições da Fig. 4.44 (imagem à esquerda).	72
Fig. 4.49: Imagens obtidas por perfilometria ótica 3D das superfícies tratadas da chapa S355 JR nas condições da Fig. 4.44 (imagem à direita).	73
Fig. 4.50: Imagens obtidas por perfilometria ótica 3D das superfícies no início da decapagem a laser das chapas S235 JR e S355 JR nas condições da Fig. 4.44.	75

Capítulo 1

Introdução

A Plafesa, Planos Férricos Portugal – Produtos Siderúrgicos, Sociedade Unipessoal, Lda, é uma empresa multinacional de produção de chapas de aço-carbono a partir de bobinas, localizada na zona industrial do Fontão (Vagos). Grande parte da matéria-prima (bobinas de aço) da empresa provém de outros países e já contém na sua superfície óxidos de ferro, na forma de um filme aderente que tem a designação de calamina. As bobinas são desenroladas e a chapa é aplanada a frio mantendo a espessura sem alteração significativa das propriedades mecânicas. Um dos problemas com que se depara a empresa é o da remoção deste subproduto da laminagem a quente do processo siderúrgico. O objetivo desta eliminação é tornar as instalações industriais e linhas de produção mais limpas, não estando relacionado com a necessidade de prevenção de defeitos nas chapas. É fundamentalmente na secção de corte transversal que alguma da calamina se liberta, bem como na fase final da linha de produção quando é feita a colocação de chapas, umas sobre as outras, para expedição. Após a passagem das bobinas nos primeiros rolos da aplanadora, parte deste subproduto é removido da superfície da chapa. No entanto, a eliminação deste resíduo não é feita na totalidade, podendo criar problemas com os seus clientes caso estes venham a exigir a venda das chapas de aço sem calamina na sua superfície. A Plafesa fornece vários sectores da indústria, tais como, construção, sistemas de armazéns, segurança rodoviária, elevadores, ar condicionado, tubagens, mas fundamentalmente a indústria automóvel.

Assim sendo, o trabalho realizado foi concretizado em parceria com a Plafesa com o intuito de analisar quais as características da calamina, bem como propor processos mecânicos e outros para a eliminação da mesma, associados a um menor impacto ambiental relativamente aos processos químicos. Além do mais, os métodos propostos não deverão afetar fortemente a rugosidade das superfícies das chapas.

O presente projeto é constituído por 4 capítulos organizados do seguinte modo:

- Capítulo 1: Introdução – Apresentação do problema e objetivo do trabalho;
- Capítulo 2: Estado da Arte – Definição de aço-carbono e descrição da produção de chapas de aço-carbono por laminagem a quente, por forma a ajudar o leitor a localizar a origem do problema (formação da calamina). Em seguida é feita uma

abordagem teórica à calamina como um subproduto de laminagem a quente e os seus processos de eliminação.

- Capítulo 3: Metodologia Experimental – Trabalho realizado em laboratório para a caracterização do pó, bem como da superfície das chapas S235 JR e S355 JR antes e após os processos de remoção da calamina. Neste capítulo são também apresentadas as condições de trabalho utilizadas nas técnicas de remoção da calamina: jateamento erosivo por via seca, jateamento com água a alta pressão, jateamento erosivo por via húmida, escovas abrasivas rotativas e ablação a laser.
- Capítulo 4: Resultados e Discussão – Apresentação dos resultados obtidos e respetiva discussão.

Capítulo 2

Estado da Arte

2.1. Definição de Aço-Carbono

O aço-carbono é uma liga ferro-carbono (0,02% a 2,06% C em peso) com boas características de ductilidade, dureza e resistência ao desgaste. De acordo com a Norma Portuguesa NP 1617 “Produtos Siderúrgicos – Classificação”, define-se *aço-carbono* como o aço que deve as suas propriedades essencialmente ao teor de carbono (C) e cuja composição, além dos teores correntes nos elementos de elaboração C, enxofre (S), fósforo (P), azoto (N) e oxigénio (O) não contém nenhum elemento de liga em quantidades superior aos mínimos indicados para o aço ligado. Como tal, os elementos de liga quando presentes na composição química de um aço-carbono não deverão ultrapassar as percentagens da *Tabela 2.1*. Para além do ferro e do carbono, os aços-carbono contêm: sempre Si, Mn, P e S; eventualmente em fraca percentagem Al, Ti, Ni, Cr; e vestígios de chumbo, estanho e arsénio. Em geral, a composição química dum aço-carbono corrente variará a percentagem de C, Si, Mn, P e S dentro dos seguintes limites: C (0,05% - 1,00%), Si (0,00% - 0,30%), Mn (0,30% - 0,60%), P (máx. 0,05%) e S (máx. 0,05%). Quando utilizado para fins tais como tratamentos térmicos de superfícies ou soldadura, os teores máximos admitidos para P, S e O são 0,02%, 0,015% e 0,01%, respetivamente. ^[1,2]

Tabela 2.1: Quantidade máxima em percentagem em peso dos elementos de liga num aço-carbono. ^[1]

Elemento de Liga	Quantidade máx. (%)	Elemento de Liga	Quantidade máx (%)
alumínio (Al)	0,10	nióbio (Nb)	0,06
bismuto (Bi)	0,10	chumbo (Pb)	0,40
boro (B)	0,0008	selénio (Se)	0,10
crómio (Cr)	0,30	silício (Si)	0,50
cobalto (Co)	0,10	telúrio (Te)	0,10
cobre (Cu)	0,40	titânio (Ti)	0,05
lantanídeos (IUPAC)	0,05	tungsténio (W)	0,01
manganês (Mn)	1,65	vanádio (V)	0,10
molibdénio (Mo)	0,08	zircónio (Zr)	0,05
níquel (Ni)	0,30		

2.2. Produção de Chapas de Aço-Carbono por Laminagem a Quente

A laminagem a quente é um processo de conformação que consiste na deformação plástica de *slabs*, modificando a sua geometria. Esta modificação ocorre durante a passagem do corpo metálico entre dois rolos que giram à mesma velocidade periférica, mas em sentidos contrários. Assim, a pressão de rolos de laminagem sobre o material é responsável pela deformação plástica do corpo metálico, diminuindo a sua espessura e aumentando o seu comprimento. ^[1,3]

A laminagem de chapas a quente envolve cinco estágios: reaquecimento, laminagem de desbaste, laminagem de acabamento, arrefecimento e bobinagem. Inicialmente, a placa de aço é reaquecida num forno a uma temperatura acima da temperatura de recristalização, a cerca de 1250°C, para reduzir a resistência à deformação plástica e homogeneizar a estrutura do material. Em seguida, a placa é conduzida para o processo termomecânico de laminagem a quente, na qual é submetida a um série de rolos de laminagem para atingir a dimensão final do produto. Finalizado o processo de laminagem a quente, as chapas de aço são arrefecidas com jatos de água até uma temperatura pré-determinada (500-760°C) e enrolada na forma de uma bobina de aço para ser enviada aos clientes. As bobinas laminadas a quente são vulgarmente designadas por chapa preta ou negra devido à sua cor e aparência, o que se deve à oxidação sofrida durante a laminagem. O fenómeno de oxidação durante o processo leva à formação de uma casca de óxidos de ferro, também designada por calamina, sobre a superfície do aço. A formação do filme é inevitável na superfície dos aços laminados a quente durante os estágios de reaquecimento (“primary scale”), laminagem a quente (“secondary scale”) e subsequente arrefecimento controlado (“tertiary scale”). ^[1,3-5]

A nomenclatura dos aços laminados a quente segue a norma EN 10025-2:2004 com o intuito de identificar as condições técnicas de entrega de aços estruturais de grão fino. Na *Tabela 2.2* estão apresentadas as designações e o respetivo significado. Por exemplo, a designação S355 JR +N corresponde a um aço estrutural com tensão de cedência mínima garantida de 355 MPa, energia mínima consumida no ensaio Charpy de 27J a uma temperatura de +20 °C, e a condição de entrega do laminado é o estado normalizado. No *Anexo A* pode ainda ser observada a composição química para produtos planos e longos de vários tipos de aço com diferentes valores de resistência ao impacto. ^[1,6,7]

Tabela 2.2: Designação dos aços laminados a quente, segundo a norma EN 10025-1:2004. ^[1,6]

Designação	Significado
S...	Aço estrutural.
E....	Aço de Engenharia.
.235	Valor mínimo de tensão de cedência do limite de elasticidade.
....JR	Energia mínima consumida no ensaio de Charpy de 27J a +20°C.
....J0	Energia mínima consumida no ensaio de Charpy de 27J a 0°C.
....J2	Energia mínima consumida no ensaio de Charpy de 27J a -20°C
....K2	Energia mínima consumida no ensaio de Charpy de 40J a -20°C.
....+AR	Bruto de laminagem. Sem condições particulares de laminagem e/ou tratamento térmico.
....+N	Material com tratamento térmico de normalização.

2.3. Calamina como um Subproduto de Laminagem a Quente

2.3.1. Constituição e Propriedades da Calamina

A calamina, também designada por carepa ou óxidos de ferro, é um subproduto de siderurgia procedente do processo de laminagem a quente formada à superfície das chapas aço-carbono. Este subproduto, comumente de cor cinza escuro, apresenta-se na forma de três óxidos de ferro ordenados e distribuídos na superfície do aço em camadas, de forma contínua ou não, sendo eles a wustite (FeO), a magnetite (Fe₃O₄) e a hematite (Fe₂O₃). Na *Tabela 2.3* são apresentadas algumas das suas características e propriedades. ^[8,9]

Tabela 2.3: Características e propriedades das 3 camadas de óxido. ^[9,10]

	Óxidos de Ferro		
	FeO	Fe ₃ O ₄	Fe ₂ O ₃
Localização e Cor	-Em contacto com o aço, de cor cinzenta/preta	-Camada intermédia de óxido, de cor preta	-Camada externa de óxido, de cor avermelhada/preta
Estrutura Cristalina	- Estrutura cúbica do cloreto de sódio, com 23 a 25% em peso de Oxigénio	- Estrutura cúbica da espinela, com 28% em peso de Oxigénio	- Estrutura romboédrica (α -Fe ₂ O ₃) -Estrutura cúbica da espinela (Y-Fe ₂ O ₃), com 30% em peso de Oxigénio
Características	-Camada macia e porosa; - Pode comportar-se como lubrificante entre as superfícies de contacto	- Podem causar atrito elevado e colocar os rolos sob uma abrasão severa	
Densidade (g/cm ³)	5,54-5,90	5,00-5,40	5,24
Dureza Vickers (HV)	270 -350	420-450	1030

Durante o processo de laminagem a quente o aço-carbono está sempre sujeito a um ambiente oxidante e, portanto, apresenta-se coberto com camadas de calamina. Deste modo, a calamina assume 30 a 35% do total de resíduos produzidos no processo de fabrico do aço, no qual o peso de calamina pode variar de 20 a 50kg/t de produtos laminados a quente. A sua formação depende de vários fatores, nomeadamente da atmosfera do forno de reaquecimento, da temperatura e tempo, do teor de SO₂ dos gases de forno, das características físicas e composição do aço (por exemplo: elevado teor de silício leva à formação de Fe₂SiO₄), temperatura dos rolos, etc. [8,11,12]

Em contrapartida, o alto teor de ferro metálico presente na calamina torna este resíduo adequado para reciclagem na indústria do aço (90%). Ainda, pequenas quantidades deste subproduto podem ter como destino a indústria de ferro-ligas, cimento e petroquímica. [8]

2.3.2. Morfologia da Calamina

Quando o ferro é oxidado ao ar a temperaturas elevadas, camadas de calamina são formadas no topo da superfície metálica. Segundo Ndiabintu [13], Kofstad (1966) afirmou que a oxidação em metais puros dá-se por difusão catiónica. Como o Fe é o principal elemento do aço, na interface metal-calamina ocorre a sua oxidação na forma de Fe²⁺. Os iões e eletrões formados migram para a superfície exterior através da calamina, reagindo com oxigénio (ou com outros oxidantes tais como CO₂ e H₂O) na interface gás-calamina para produzir O²⁻. Os iões de O por sua vez reagem com os iões de Fe²⁺ para formar novo FeO. [13]

De acordo com o diagrama de fase Fe-O (*Anexo B*) é possível constatar que a composição da calamina é dependente da temperatura. Desta forma, abaixo de 570°C o FeO é termodinamicamente instável o que impossibilita a sua formação, pelo que só o Fe₃O₄ (camada em contato com a superfície metálica) e o Fe₂O₃ se formam na superfície da chapa. No entanto, acima de 570°C toda a série de óxidos se podem formar, sendo FeO a camada próxima da superfície metálica. Segundo Sun [12], estudos realizados por Paidassi (1958) sobre oxidação de Fe em ar revelam que a temperaturas elevadas entre 700°C e 1300°C, o óxido predominante é FeO representado cerca de 95% da calamina, enquanto Fe₃O₄ e Fe₂O₃ representam apenas 4% e 1%, respetivamente. Ainda Sun [12] mostra que num estudo realizado por Tominaga et al. (1982) também foi estudada a fração molar dos 3 óxidos em função da temperatura (*Fig. 2.1 (a)*) e mudanças na composição dos óxidos com o tempo, quando Fe oxida ao ar. [9,12-14]

Estudos mostram que a espessura da calamina no aço laminado a quente é determinada pela temperatura da laminagem de acabamento, enquanto a estrutura final da camada de óxidos é

função da temperatura de arrefecimento da chapa. A morfologia final e composição da estrutura da camada de óxidos estão também diretamente associadas à temperatura de enrolamento, taxa de arrefecimento da bobina e disponibilidade de oxigênio. Durante o arrefecimento ($T > 570^\circ\text{C}$) e na presença de O, a calamina continua a crescer sobre a chapa e mantém a estrutura de 3 camadas (FeO , Fe_3O_4 e Fe_2O_3) até à temperatura eutetóide do sistema Fe-O. No entanto, quando a temperatura diminui abaixo de 570°C a camada de FeO torna-se instável e decompõe-se numa mistura de $\alpha\text{-Fe}$ e Fe_3O_4 através de uma reação eutetóide (*Anexo B e equação 2.1*), como se pode constatar pela *Fig. 2.1 (b)*.^[9,12,13,15-18]

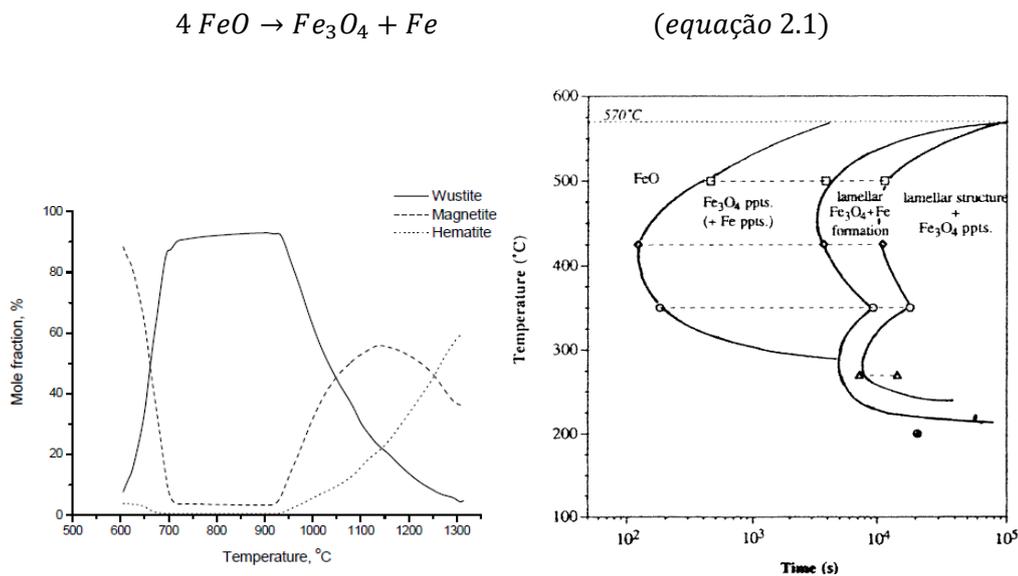


Fig. 2.1: (a) Fração molar dos 3 óxidos de ferro em função da temperatura e (b) diagrama de transformação isotérmica da camada de FeO formada termicamente num aço macio a 900°C em ar.^[12,18]

2.3.3. Influência dos Elementos de Liga

Os elementos de liga da composição do aço podem afetar o crescimento e distribuição das camadas de Fe_3O_4 e Fe_2O_3 , bem como os mecanismos de difusão iónica através das camadas correspondentes. Normalmente, a existência de Cr, Al e Si na composição de um aço, que são menos nobres do que o Fe, fornecem um certo grau de resistência à oxidação do aço. No entanto, o efeito de proteção torna-se insignificante se os seus níveis forem muito baixos. Através da *Fig. 2.2* observa-se que o aumento do elemento de liga Si proporciona uma redução da taxa de oxidação e espessura da calamina. Para quantidades superiores a 0,25% poderá dar-se a formação de uma camada de faialite (Fe_2SiO_4) estequiométrica, com tendência para formar na interface metal-óxido. A presença de Fe_2SiO_4 reduz a taxa de migração dos iões de Fe. Quando a

temperatura se encontra acima de 1173 °C, FeO e Fe₂SiO₄ formam um tipo de microestrutura eutetóide em que grãos de FeO são rodeados por Fe₂SiO₄.^[13,18-21]

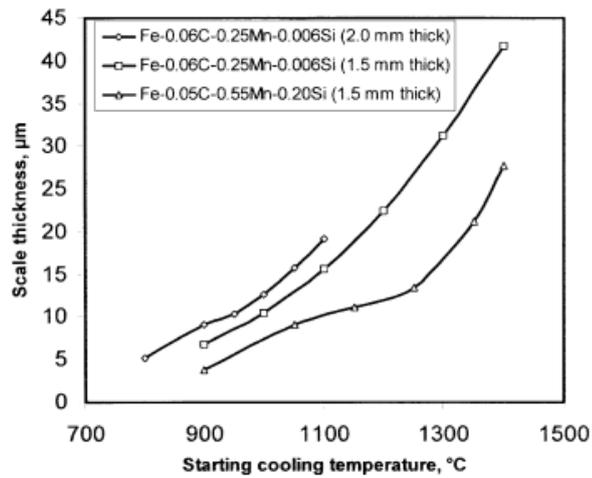


Fig. 2.2: Crescimento da calamina na superfície de 3 aços de baixo carbono em arrefecimento contínuo.^[19]

2.3.4. Cinética de Crescimento de Calamina

A cinética de oxidação é determinada pela temperatura e tempo, sendo que para um período prolongado a elevadas temperaturas resulta na formação de uma calamina mais espessa. Segundo Melfo^[14], Marston et al. (2004) descreveram a taxa de formação de óxido como tendo dois estágios, um crescimento linear no estágio inicial de oxidação seguido por um crescimento parabólico quando uma certa espessura de óxido é alcançada. A transferência de espécies oxidantes do gás para a interface gás-óxido controla portanto a taxa de reação. Inicialmente, o crescimento da calamina é diretamente proporcional ao tempo (*equação 2.2*). Isto deve-se ao facto de a superfície metálica não estar protegida por um óxido de barreira e como tal a taxa de oxidação mantém-se constante ao longo do tempo.^[9,12-14]

$$X = K_L t \quad (\text{equação 2.2})$$

onde X - espessura da calamina a temperatura constante, K_L - coeficiente de oxidação linear, t - tempo de oxidação.

Quando o mecanismo de oxidação passa a realizar-se por meio da difusão de iões através de uma barreira compacta de óxidos, a taxa de crescimento muda de linear para parabólica, pois quando a camada de óxido é espessa a velocidade de transferência entre O e Fe no topo da calamina decresce drasticamente (*equação 2.3*). Na *equação 2.3* o K_p obedece a uma equação de Arrhenius (*equação 2.4*). Neste estágio, o potencial de oxigénio na interface gás-óxido torna-se

significativamente maior do que na interface óxido-metal, sendo que o gradiente de concentração de oxigênio diminui com o crescimento de óxido. ^[9,12-14]

$$X^2 = K_p t + X_0 \quad (\text{equação 2.3})$$

onde K_p - coeficiente de oxidação parabólico, X_0 - espessura inicial da calamina.

$$K_p = A \cdot e^{-Q/RT} \quad (\text{equação 2.4})$$

onde A - constante pré-exponencial, Q - energia de ativação, R - constante universal dos gases perfeitos ($8,314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$), T - temperatura.

2.3.5. Grau de Oxidação

A avaliação do estado de uma superfície é o primeiro passo na preparação de um metal para pintura e outros processos de proteção das superfícies. Segundo a ISO 8501-1:2007 "Corrosion Protection of Steel Structures by Painting" existem 4 graus de oxidação que se encontram normalmente nas superfícies de aço não revestido e nas superfícies de aço armazenadas (*Tabela 2.4*). De entre os graus de oxidação, os graus B e C são os de maior facilidade de remoção enquanto os graus A e D podem dificultar a decapagem. Quando a remoção da calamina é difícil, muitas vezes o intemperismo é utilizado como etapa inicial para promover a conversão da calamina. No entanto, o uso desta técnica exige acompanhamento durante a exposição de modo a evitar a corrosão severa do substrato. ^[22,23]

Tabela 2.4: Graus de oxidação e sua descrição. ^[22,23]

Grau de Oxidação	Ilustração da Superfície de Aço	Descrição
Grau A		Superfície de aço revestida por calamina de laminagem aderente e praticamente sem corrosão.
Grau B		Superfície de aço com oxidação residual e onde a calamina de laminagem começa a desprender-se.
Grau C		Superfície de aço cuja calamina de laminagem desapareceu pela ação da oxidação ou que pode eliminar-se raspando, mas com leves picadas visíveis.
Grau D		Superfície de aço cuja calamina de laminagem desapareceu por ação da oxidação e em que se vêem numerosas picadas.

2.4. Métodos de Eliminação da Calamina

2.4.1. Processos de Remoção

Os processos de limpeza da calamina, designados por decapagem, podem ser mecânicos ou químicos e têm como objetivo remover todos os vestígios indesejáveis presentes na superfície do metal. A escolha da técnica dependerá do material a ser limpo e do tipo de material a ser removido. Segundo Graziani ^[24] um aumento na espessura da calamina torna mais eficiente a decapagem mecânica, enquanto que espessuras mais reduzidas tornam o processo de decapagem mecânica mais difícil. Na *Tabela 2.5* encontra-se indicado o melhor processo de remoção de calamina de acordo com a sua espessura. ^[24]

Tabela 2.5: Técnicas de decapagem de acordo com a espessura da calamina. ^[24]

Espessura da Calamina (μm)	Tipo de Decapagem
<10	Decapagem Química
10-15	Decapagem Química e Mecânica
>15	Decapagem Mecânica

A remoção da calamina no aço é geralmente realizada por processos químicos em ácido clorídrico (HCl). No entanto, tendo em vista melhorias de produtividade e de proteção do ambiente, a decapagem mecânica tem sido recentemente utilizada para substituir a decapagem química. Segundo Gillstrom e Jarl ^[25] a decapagem química é aquela que produz maior quantidade de resíduos, sendo eles: ácido (clorídrico ou sulfúrico, em geral) utilizado no banho de decapagem, lodo produzido durante a decapagem e água de limpeza. Além do mais, em processos de decapagem química o ácido clorídrico tem uma forte tendência para vaporizar, dando origem a emissões de gases de efeito de estufa. Em contrapartida, a decapagem mecânica proporciona como único tipo de desperdício os óxidos de ferro, que por sua vez se podem reciclar para o alto-forno de siderurgia. Os regulamentos de controlo de poluição estão a tornar-se mais rigorosos, de modo que o processo de decapagem se tornará mais e mais caro. Para além de problemas ambientais associados à decapagem química, a decapagem mecânica é bem mais económica do que a decapagem química. Desta forma, no trabalho de investigação apenas serão abordados técnicas de decapagem sem produtos químicos, capazes de remover toda a calamina existente na superfície da chapa de aço-carbono, apesar da eficiência da decapagem química.

[5,15,25-27]

Um método alternativo e que tem atraído considerável interesse em comparação com os métodos convencionais é a limpeza a laser. Novas tendências no desenvolvimento do laser

permitem a limpeza de superfícies metálicas usando feixes de laser sem levantar problemas ambientais, pois não utilizam produtos químicos ou solventes perigosos. O único subproduto gerado é a sujidade ejetada da superfície a qual é recolhida e seguidamente despejada pela utilização de um qualquer sistema de extração eficiente. [28,29]

2.4.2. Processos Mecânicos

A eficiência da decapagem mecânica está ainda determinada pela uniformidade da calamina e rugosidade da superfície metálica. Quanto mais lisa for a interface metal-calamina, melhor será a ação de decapagem mecânica. De entre vários processos de remoção de calamina, esta pode ser removida por jateamento erosivo por via seca, jateamento erosivo por via húmida, jateamento com água a alta pressão e escovas rotativas. [9,24-27]

2.4.2.1. Jateamento Erosivo por Via Seca

O jateamento erosivo por via seca, que em inglês tem a designação de “shot blast”, é uma técnica de tratamento de superfície em que a limpeza é feita através do bombardeamento de partículas erosivas a alta velocidade (65-110 m/s). Durante a decapagem, as chapas de aço movimentam-se continuamente com a ajuda de rolos no interior da câmara de bombardeamento, onde estão expostas a partículas erosivas aceleradas por turbinas centrífugas (Fig. 2.3). O impacto contra a superfície da peça a tratar provoca a quebra da calamina existente na sua superfície, produzindo poeira. Deste modo, pó que é produzido na operação é basicamente o resultado dos materiais retirados a partir da superfície que está a ser tratada, os quais são removidos por um sistema de coleta de pós. Segundo Mallory [32], o número de turbinas montadas no interior da câmara é determinado pelo tamanho e complexidade da peça a limpar. As partículas erosivas provenientes de cada turbina atingem uma área cerca de 7,5 a 10 cm de largura e até 76 a 91 cm de comprimento, dependendo da sua distância à superfície metálica da peça. [26,30-32]

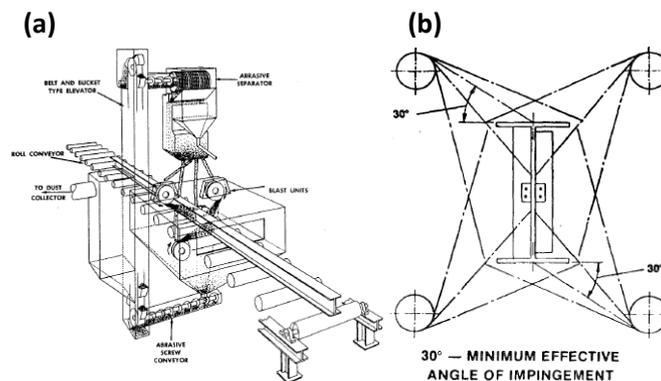


Fig. 2.3: (a) Ilustração esquemática de máquina de jateamento de 4 turbinas (b) Exposição da peça de trabalho durante a decapagem. [32]

Através de processos de recuperação automática os agentes erosivos são capazes de serem projetados 700 a 5000 vezes de acordo com o diâmetro, o tipo e dureza. Materiais como a areia, pequenas esferas de aço de vários diâmetros e partículas de alumina ou carboneto de silício podem ser utilizados como agentes erosivos para remoção de calamina. Ao contrário das partículas de areia, a granalha de aço representa menor perigo para a saúde humana devido a uma menor produção de poeira e que por sua vez apresenta uma boa eficiência de limpeza. Na *Tabela 2.6* são apresentadas algumas das características dos materiais erosivos que permitem a remoção de calamina. [26,30-32]

Tabela 2.6: Guia de Materiais Erosivos. [31]

	Aço "Shot"	Aço "Grit"	Carboneto de Silício	Óxido de Alumínio
Acabamento	✓	✓	✓	✓
Limpeza/Remoção	✓	✓	✓	✓
Velocidade de Trabalho	Média	Média - Elevada	Muito Elevada	Elevada
Reciclabilidade	Muito Elevada	Muito Elevada	Média -Baixa	Média - Elevada
Probabilidade de Remover Metal	Muito Baixa	Média	Média- Elevada	Média- Elevada
Dureza, escala de Mohs (Rockwell C)	6-7.5 (35-55)	8-9 (40-66)	9	8-9
Densidade Aparente (g/cm ³)	4,5	3,7	1,5	2,0
Tamanho de Malha (#)	8-200	10-325	36-220	12-325
Pressão de Jateamento Típica (bar)	1,4-6,2	1,4-6,2	1,4-6,2	1,4-6,2
Formas: Δ angular; O esférica	O	Δ	Δ	Δ

Segundo Mallory [32], a calamina aderente e existência de alguma ferrugem na superfície metálica (graus A e B) são mais eficazmente removidas a partir de partículas erosivas de aço "grit" (40-50 RC) do que aço "shot" (40-50 RC). Para a oxidação dos graus C e D, partículas de aço "grit" proporcionam um remoção mais eficaz do que aço "shot". [32]

2.4.2.2. Jateamento Erosivo por Via Húmida

O jateamento erosivo por via húmida é um método de limpeza de superfícies metálicas na qual é feito um bombardeamento com os elementos erosivos mais água. Este método trouxe vantagens em relação ao jateamento erosivo por via seca: diminuição de problemas na saúde associados à produção de poeiras, e eliminação de produtos de corrosão na superfície do aço. Contudo, depois do bombardeamento ocorre o início de uma oxidação rápida da superfície, que pode ser impedido com a utilização de inibidores de corrosão. [33]

Voges e Mueth ^[27] desenvolveram uma tecnologia EPS (*Eco-Pickled Surface*), na qual se faz a remoção da calamina por jateamento erosivo por via húmida, que em inglês tem a designação de “slurry blast”. Esta tecnologia combina um agente erosivo metálico de partícula fina com um “veículo líquido” (o mais comum sendo a água), na qual a mistura é impulsionada a alta velocidade através da superfície metálica que se move continuamente. Durante o processo, a dispersão uniforme de agente erosivo ao longo de toda a largura da chapa de aço é fundamental, visto que uma dispersão inadequada deixaria alguma calamina intacta. No entanto, uma exposição excessiva ao fluxo de jato erosivo pode remover substrato e degradar a superfície do aço. Deste modo, a cabeça de sopro da mistura é concebida para distribuir uma pulverização uniforme da mistura (*Fig. 2.4*), sendo utilizado no mínimo 4 cabeças de descarga de forma a tornar a remoção da calamina completa. ^[27]

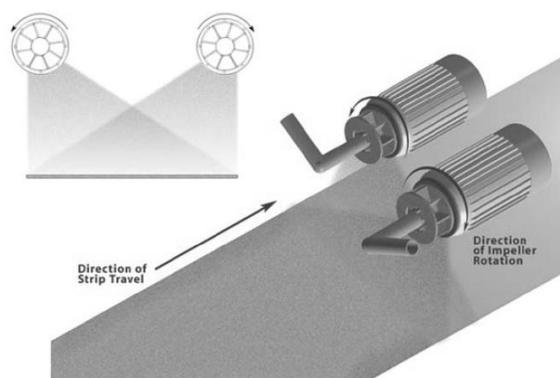


Fig. 2.4: Configuração ideal de “slurry blasters” numa chapa de aço. ^[27]

A empresa The Material Works LTD. (TMW) concebeu um programa de pesquisa e design para estudar esta nova tecnologia de remoção de calamina, variando parâmetros tais como: tipo de material erosivo, tamanho, forma e dureza, velocidade, caudais da mistura de suspensão, ângulo de incidência do fluxo de exposição, e distância à chapa de aço. Além do mais, a decapagem mecânica está projetada para permitir a recolha da mistura durante o processo com o intuito de reutilizar o agente erosivo metálico e o veículo líquido, o que reduz o custo operacional global. A seleção adequada do material erodente é de vital importância para a eficiência dos “slurry blasters”, devendo apresentar dureza elevada de modo a ser eficaz e resistir a centenas de impactos que serão submetidos através da sua reutilização contínua. No entanto, apesar da camada de hematite apresentar uma dureza de 65 Rockwell C, a dureza dos elementos erosivos não necessita de ser superior devido ao facto desta camada ser bastante fina. Ao longo da decapagem, o material erodente já degradado, que atingiu um tamanho mínimo ($d_{m\acute{a}x.} = 0,710$ mm

e $d_{\min.} = 0,300$ mm), é filtrado para fora do sistema. De entre partículas de forma esférica e irregular, com designação em inglês de “shot” e “grit” respectivamente, as últimas são as que apresentam uma maior eficiência para velocidades de projeção inferior (cerca de 45 m/s). Uma baixa velocidade de projeção evita que o agente erosivo fique embutido na superfície do substrato. Como material erosivo, as partículas de aço inoxidável atingem níveis desejáveis de remoção de calamina e proporcionam uma superfície muito uniforme. Contudo, o seu elevado custo impede a sua utilização para aplicação comercial em grande escala. Como solução deste problema, a TMW usou na sua investigação partículas de aço carbono, que apesar de apresentarem elevado potencial de corrosão na solução de suspensão aquosa, têm um custo que é aproximadamente um quarto do das partículas de aço inoxidável. De modo a reduzir o efeito de oxidação das partículas de aço carbono é adicionado um aditivo de elevado pH, que provou ser eficaz. [27]

Da análise de espectros de EDS realizados em amostras antes e depois dos “slurry blasters” (Fig. 2.5) verificou-se que o processo de decapagem alcançou a remoção completa de calamina. O pico de oxigénio (O) identificado pelo espectrómetro antes dos “slurry blasters” evidencia a existência de níveis de O indicativos de depósitos de óxido na superfície do aço, que por sua vez é removido após a decapagem (ausência do pico de O). No final, a superfície do aço apresentava uma rugosidade R_a de 1-2 μm , que corresponde a um padrão aceitável de indústria no que se refere a este tipo de processos. [27]

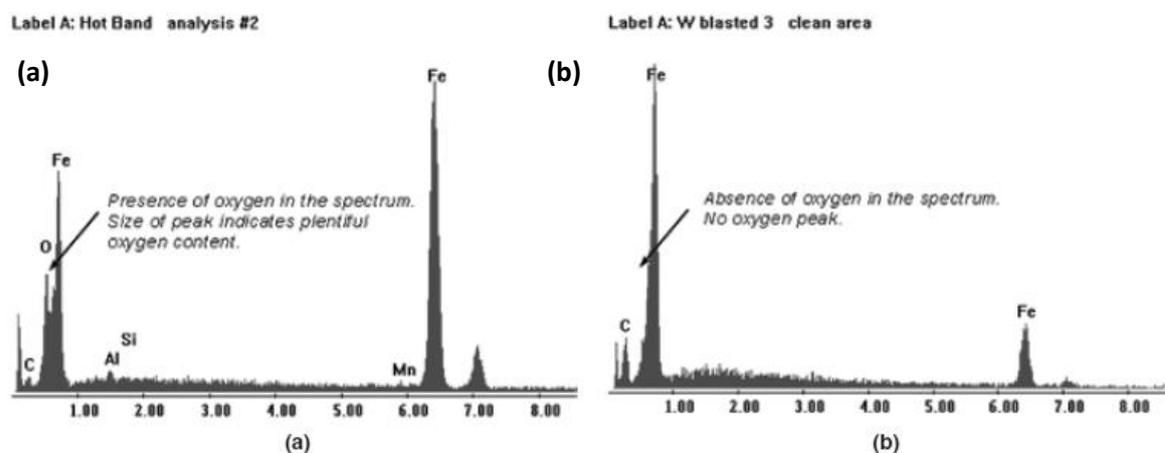


Fig. 2.5: EDS da superfície do aço (a) antes do “slurry blasters” e (b) depois do “slurry blasters”. [27]

2.4.2.3. Jateamento com Água a Alta Pressão

O jateamento com água a alta pressão, também designado por sistema de desincrustação hidráulico, é a prática mais utilizada para a remoção de calamina. Esta técnica depende inteiramente da energia da água que atinge a superfície metálica, não sendo utilizados agentes erosivos. Como tal, opera a pressões entre 80-500 bar com fluxos entre 10 a 200 l/min. Os sistemas de desincrustação hidráulica são constituídos por uma bomba que permite um jateamento de água a alta velocidade na superfície metálica, através de uma série de bocais, na qual o jato de água tem um padrão de pulverização definido. Porém, a eficiência da desincrustação hidráulica depende da forma do jato, ângulo de pulverização, tempo de exposição ao jato de água, pressão de pulverização na superfície do aço e espessura da calamina. [9,13,34]

Durante o processo de desincrustação a placa de aço é movida através do sistema de decapagem, na qual os bicos apresentam um ângulo de pulverização (α) entre 22° a 40°. A remoção da calamina é realizada ao mesmo tempo em ambos os lados da chapa através de jatos que apresentam um ângulo de inclinação relativamente à superfície metálica (Fig. 2.6), sendo a distância de pulverização (h_2) típica de 50 a 200 mm. Quando as gotículas de água entram em contacto com a superfície do material a camada de óxidos é deformada pela sua ação de penetração. [9,13,34]

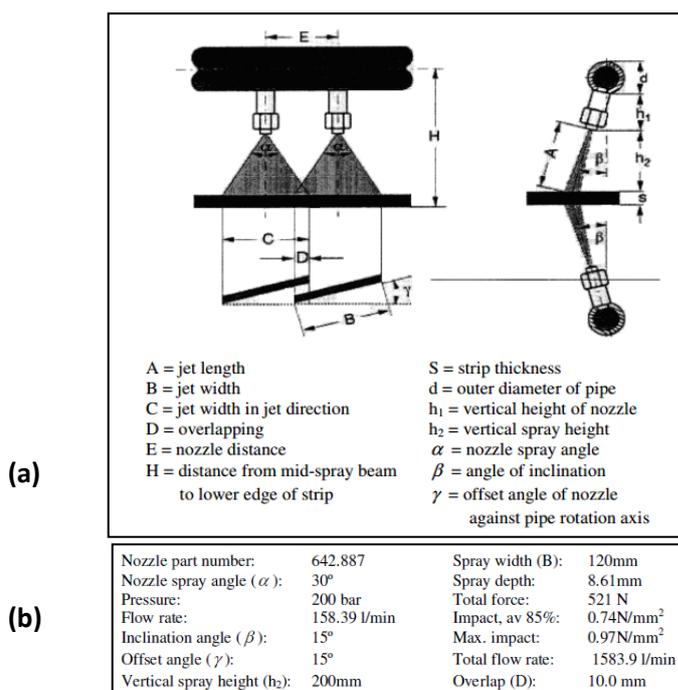


Fig. 2.6: (a) Arranjo típico do bico com a lista de termos e símbolos e (b) proposta de uma instalação típica de decapagem realizada por meio do programade Lechler Descale. [13]

Segundo Sheridan e Simon ^[35] os melhores resultados de decapagem são obtidos para bicos com a forma elíptica. Além do mais, o processo de remoção é mais eficaz para bicos de desincrustação mais pequenos, mas usando um maior número de bocais. Outro parâmetro importante é o valor da pressão de impacto (*equação 2.5*). Este parâmetro é expresso pelo quociente entre a força do jato e a área sob a qual esta força é aplicada [N/m²]. Na *Fig. 2.7* observa-se que a força de impacto é afetada pela pressão do jato, bem como pela distância do jato à superfície da chapa de aço. ^[9,13,34,35]

$$\text{Pressão de Impacto} = \frac{F[N]}{A[m^2]} \quad (\text{equação 2.5})$$

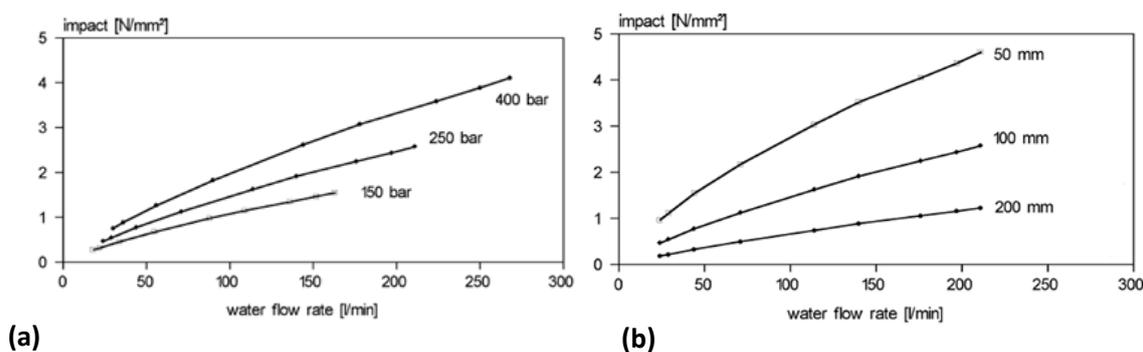


Fig. 2.7: (a) Pressão de Impacto de pulverização para diferentes pressões e (b) pressão de impacto de pulverização para diferentes distâncias de pulverização. ^[34]

2.4.2.4. Escovas Rotativas

A informação disponível na literatura sobre escovação para remoção da camada de óxidos é pobre. No entanto, o método não é recomendado para aço que apresente carepa intacta, pois a calamina é mais dura do que as cerdas de aço das escovas. Além do mais, parte da calamina permanece na rugosidade da superfície metálica com o uso de escovas de aço. Segundo a norma sueca, o uso de escovas rotativas é dirigido apenas para situações de enferrujamento do grau C. ^[22,25]

2.4.3. Processos Físicos

2.4.3.1. Laser

A radiação laser é uma luz intensa monocromática que é emitida como um feixe altamente colimado. Recentemente, o laser tem provado ser muito bem-sucedido na remoção de camadas na indústria de semicondutores, p. ex., óxido de cobre em cobre, eliminação das camadas de corrosão e da contaminação radioativa em metais, e limpeza de moldes no fabrico de pneus. Apesar de existir um número de aplicações bem-sucedidas que têm sido relatadas, a limpeza a

laser tem as suas desvantagens na prática. A exposição excessiva ao pulso de laser pode facilmente resultar em danos no substrato devido à alta densidade de energia do feixe. Além do mais, o filme de contaminantes sobre a superfície do substrato não se apresenta distribuído uniformemente, o que pode gerar danos em algumas áreas do substrato enquanto outras ainda têm contaminação residual se as mesmas condições de irradiação de laser forem aplicadas em toda a superfície durante o varrimento a laser. ^[28,29]

No anexo C apresentam-se diferentes tipos de lasers com comprimentos de onda característicos na região do infravermelho (IR), visível ou ultravioleta (UV). Segundo Lafargue et al. ^[28], um filme fino de óxidos pode ser removido de um substrato metálico usando um laser Nd-YAG (1064 nm). No entanto, poucas publicações têm investigado a limpeza a laser de chapas de aço com calamina na sua superfície. Chen et al. ^[37] estudaram a limpeza de chapas de aço laminadas a quente com calamina (~30 µm de espessura) na sua superfície, testando um laser de fibra de alta potência especialmente adaptado (Fig. 2.8). ^[28,36,37]

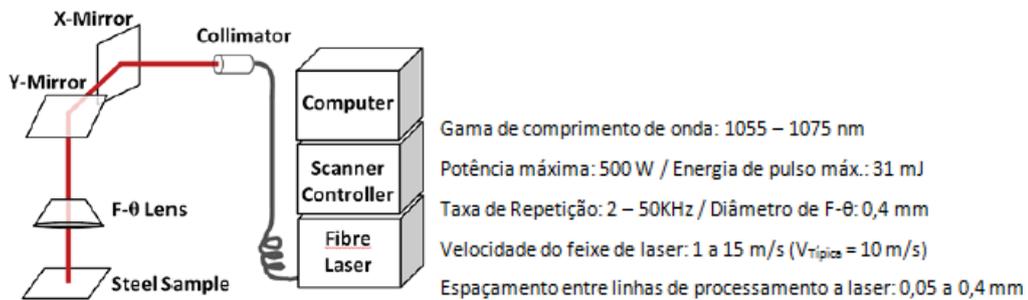


Fig. 2.8: Diagrama esquemático da configuração experimental. ^[37]

Na Fig. 2.9 (a) observa-se que antes do tratamento a laser a calamina apresenta pequenas saliências e uma superfície áspera com microfissuras. Após o tratamento as pequenas saliências são removidas para formar uma superfície relativamente lisa (Fig. 2.9 (b) e (c)). No entanto, para limpar completamente a camada de calamina é necessário fazer múltiplas passagens, até 20 vezes, com um laser de fibra. Resultados de EDS comprovaram que um alto grau de limpeza das superfícies de aço pode ser obtido aumentando o número de varrimentos a laser. Desta forma, a rugosidade da superfície metálica é reduzida pela ablação da calamina. ^[37]

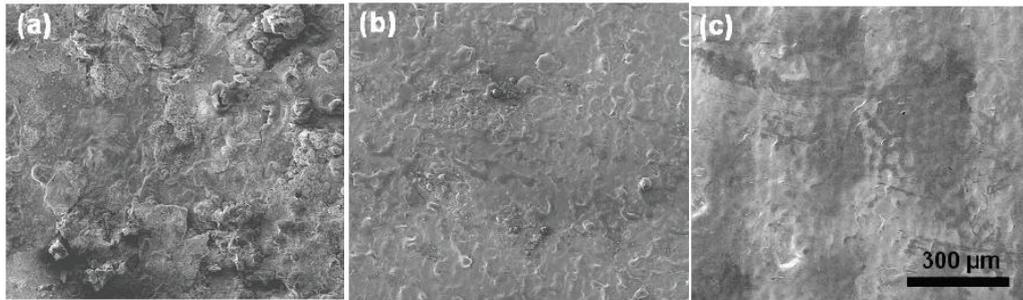


Fig. 2.9: Microestruturas obtidas por SEM da superfície (a) original, (b) tratada a laser de fibra de alta potência com 2 e (c) 20 passagens. As barras de escala das imagens são do mesmo tamanho. ^[37]

Durante o tratamento a laser dá-se um aumento da temperatura com o número de passagens do feixe (Fig. 2.10). A interação intensa do laser com a matéria leva a um forte aquecimento dos materiais de base. Na presença de oxigénio, as amostras de aço podem desde modo oxidar-se, podendo causar problemas na qualidade da limpeza. Para evitar a oxidação gerada pelo laser, é utilizado normalmente um gás inerte durante o processo de limpeza. No entanto, para varrimentos a laser de 20 vezes, onde se atingiram temperaturas de 63°C, a superfície metálica não foi induzida a oxidar de forma grave. ^[37]

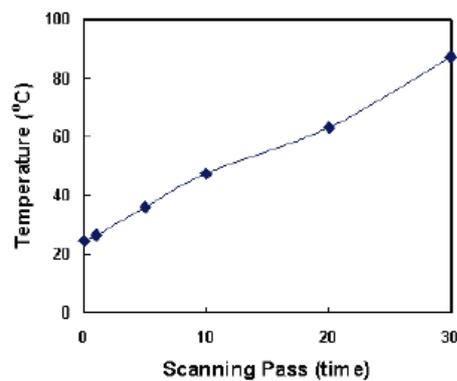


Fig. 2.10: Temperatura da superfície após o tratamento com laser. ^[37]

Capítulo 3

Metodologia Experimental

3.1. Técnicas de Caracterização dos Materiais Antes e Após os Processos de Decapagem

3.1.1. Caracterização do Pó

Da empresa foi recolhida uma amostra da calamina libertada durante o processo de aplanar as bobinas numa das linhas de produção onde ocorre maior libertação. O pó foi caracterizado por difração de raios-X (DRX) e distribuição granulométrica (Coulter Counter), com intuito de identificar a composição química e distribuição de tamanhos de partículas da calamina. Para a difração de raios-X do pó utilizou-se um difractómetro Rigaku Geigerflex D/max-Series nas seguintes condições de trabalho:

- Intervalo de varrimento de $10^\circ < 2\theta < 90^\circ$
- Velocidade de varrimento: $3^\circ/\text{min}$;
- Passo de medida (2θ): $0,02^\circ$
- Temperatura de medida: 25°C
- Ânodo: cobre (radiação K_α)
- Configurações do gerador: 40 mA, 45KV.

3.1.2. Caracterização das Chapas S235 JR e S355 JR Antes e Após Processos de Decapagem

Para estudar os diferentes métodos de decapagem foram utilizadas chapas de aço-carbono de bobinas das qualidades S235 JR e S355 JR, fornecidas pela empresa com espessuras de 3 mm e 2 mm, respetivamente. Ambas as bobinas, obtidas por processos de laminagem a quente no fornecedor, contêm na sua superfície calamina. Na *Tabela 3.1* encontra-se a composição química das chapas, sendo as características mecânicas as referidas na *Tabela 2.2*.

Tabela 3.1: Composição química das chapas S235 JR e S355 JR.

Chapa	Composição Química (% peso máx.)						
	C	Si	Mn	P	S	N	Cu
S235 JR	0,170	-	1,400	0,035	0,035	0,012	0,550
S355 JR	0,240	0,550	1,60	0,035	0,035	0,012	0,550

Antes dos processos de decapagem a superfície das chapas foi examinada através de uma lupa (Leica) para comparar o aspeto/cor da calamina entre as duas qualidades de chapa. A identificação dos óxidos das chapas foi feita a partir da técnica de DRX nas mesmas condições utilizadas no pó. Para analisar a espessura do filme de óxidos foi utilizado o microscópio óptico (OM) (Nikon Microphot) e microscópio eletrónico de varrimento (SEM) (Hitachi S4100). As chapas foram cortadas em pequenos pedaços para observação metalográfica em secção. Para isso, foi feito o embutimento a quente com resina acrílica, seguido de desbaste com papel abrasivo de SiC até 1200 grit, e polimento com pasta de diamante de 3 e 1 μm de granulometria.

Para uma primeira observação das superfícies tratadas pelas diversas técnicas de decapagem em avaliação, recorreu-se à lupa com intuito de observar o aspeto da superfície limpa. Técnicas como espectroscopia de energia dispersiva (EDS) e perfilómetro ótico 3D (Sensofar S-neox) foram utilizadas para a caracterização química e topográfica das chapas com o objetivo de estabelecer uma comparação entre a superfície original e após decapagem.

A determinação dos parâmetros de rugosidade em área, como a média aritmética da rugosidade superficial (S_a), desvio padrão da curva de distribuição (S_q), altura máxima dos picos (S_p) e profundidade máxima dos vales (S_v) foi feita a partir de uma região $1,75 \times 1,32 \text{ mm}^2$ ampliada por uma lente objetiva de 10x. Para as zonas tratadas analisaram-se seletivamente regiões de substrato em áreas mais reduzidas ($218,01 \times 163,83 \mu\text{m}^2$).

3.2. Processos de Decapagem

3.2.1. Jateamento Erosivo por Via Seca

A remoção da calamina nas amostras foi realizada através de um jato erosivo adaptado a partir de uma máquina de ensaios de erosão, norma ASTM G76-95 (*Fig. 3.1*), existente no departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro. O bico tem um diâmetro interno de 3,5 mm, a partir do qual o fluxo de material erodente é projetado por ar comprimido contra a superfície metálica a alta velocidade. O equipamento, controlado pelo software DasyLab, permite testar a influência do fluxo de material erodente (g/min), pressão do jato (bar) e tempo de erosão (s). O nível de adaptação do equipamento apenas permitiu testar pressões até 2,82 bar, o que condicionou o teste para valores de pressão mais altos como proposto na literatura (*Tabela 2.6*).



Fig. 3.1: Equipamento de jato erosivo utilizado no trabalho.

Como material erodente testou-se duas qualidades de agente erosivo angular, nomeadamente alumina (Al_2O_3) e carboneto de silício (SiC) com tamanhos médios de partícula de 50 μm . Na *Tabela 3.2* encontram-se as condições de ensaio testadas no equipamento. Durante os ensaios foi utilizada uma distância constante de 26 mm entre o jato e a base onde as amostras de chapa de aço foram colocadas, sem ângulo de inclinação. No final de cada ensaio as superfícies tratadas foram limpas com um pincel para não influenciar posteriores análises de caracterização, uma vez que há a possibilidade de material erosivo ficar localizado sobre a superfície metálica.

Tabela 3.2: Condições de jateamento erosivo para Al_2O_3 e SiC.

Agente erosivo	Tempo (s)	Pressão (bar)	Fluxo de Material Erodente (g/min)		
			5	4	3
Al_2O_3	15	2,80	✓	✓	✓
	30		✓	✓	✓
SiC	15		✓	✓	✓
	30		✓	✓	✓

3.2.2. Jateamento com água a Alta Pressão e Jateamento Erosivo por Via Húmida

Através de uma máquina de corte com jato de água e agente erosivo (*Fig. 3.2*), existente na Escola Superior Aveiro Norte (ESAN), testou-se o efeito do jateamento com água a alta pressão e jateamento erosivo por via húmida. Trata-se de um equipamento que permite trabalhar a pressões de 380 e 50 bar, que incorporando por efeito Venturi um agente erosivo ao jato de água sempre que necessário.



Fig. 3.2: Equipamento de corte por jato de água com agente erosivo existente na ESAN.

Como material erodente testou-se apenas uma qualidade, a monticellite ($\text{Fe}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$) com tamanho médio de partícula de 177 μm . A escolha deste material deve-se ao facto de ser o único disponível para a realização dos ensaios. Na *Tabela 3.3* encontram-se as condições de ensaio testadas no equipamento. Parâmetros como a distância bico-chapa (mm), pressão (bar), velocidade de avanço do bico (m/min) e fluxo de material erosivo (g/min) foram tidos em consideração para estudar o grau de remoção da calamina. Apenas a chapa S235 JR foi sujeita a este tipo de decapagem mecânica, uma vez que os resultados obtidos para esta qualidade em termos de rugosidade não são os mais apropriados e como tal decidiu-se não repetir os mesmos procedimentos para a chapa S355 JR.

Tabela 3.3: Condições de jateamento com água a alta pressão e jateamento erosivo por via húmida para a chapa S235 JR.

Condição	Tipo de Jateamento	Distância Bico-Chapa (mm)	Pressão (bar)	Velocidade (m/min)	Fluxo de Material Erosivo (g/min)
A	S/Erosivo	164	380	15	X
B		144			
C		124			
D		104			
E		84			
F		64			
G		44			
H	C	4	380	5	X
I				1	
J				0,1	
L			50	0,1	
M	C/Erosivo	164	380	15	250
N		4			150
O					250

Após a decapagem mecânica, as superfícies tratadas foram de imediato secas com ar comprimido por forma a tentar reduzir o grau de oxidação da superfície metálica causada pela água. Como o equipamento não é utilizado para limpeza de superfícies não foi possível testar o uso de inibidores de corrosão.

3.2.3. Remoção com Escovas Rotativas

Para implementar as escovas rotativas no trabalho foi feita uma adaptação de uma rebarbadora PARKSIDE com um suporte metálico (*Fig. 3.3*), que apresenta propriedades magnéticas, por forma a tonar fixa a chapa. A rebarbadora permite trabalhar a 7 velocidades de rotação, nomeadamente a 3000, 4500, 6000, 7500, 9000, 10500 e 12000 RPM. No entanto, a carga exercida sobre a superfície metálica não será uma variável possível de estudar, uma vez que é feita manualmente.



Fig. 3.3: Máquina de escovas rotativas adaptado utilizado no trabalho.

Face às condições de manuseamento do equipamento, os parâmetros estudados no trabalho foram as velocidades de rotação e a granulometria (grit) do material (Al_2O_3) das escovas, e ainda o tempo de exposição da superfície à escova. Escovas abrasivas com cerdas cilíndricas de nylon com partículas de 80 e 125 μm de Al_2O_3 foram utilizadas para remoção do filme de óxidos (*Fig. 3.4 (a) e (b)*). Ambas as escovas apresentam uma largura (L) de 18 mm, $D_1 = 150$ mm e $D_2 = 32$ mm. O diâmetro das cerdas varia também com o tamanho de partícula: 0,89 mm para a escova de 80 μm e 1,02 mm para a escova de 125 μm . Também lamelas de manta abrasiva com partículas de 150 μm de Al_2O_3 foram incluídas no trabalho de investigação (*Fig. 3.4 (c)*). A largura desta escova é de 20 mm, com $D_1 = 150$ mm e $D_2 = 45$ mm. Na *Tabela 3.5* encontram-se os parâmetros estudados para as três escovas utilizadas.

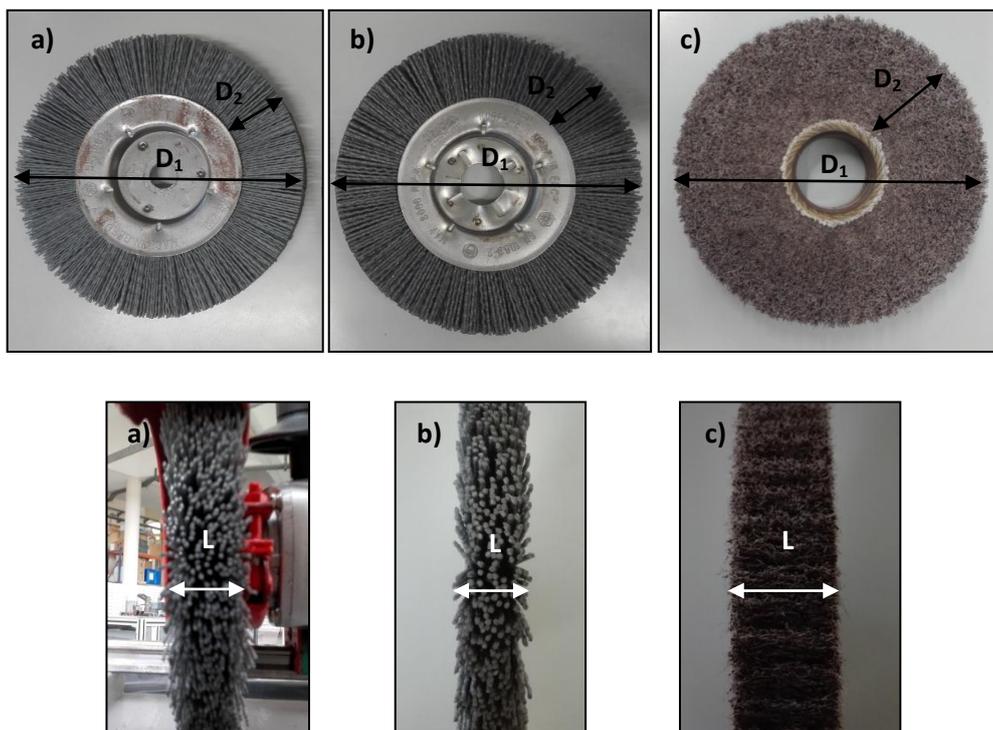


Fig. 3.4: Escovas de nylon abrasivo a) $80 \mu\text{m Al}_2\text{O}_3$ e b) $125 \mu\text{m Al}_2\text{O}_3$ e c) lamela de manta abrasiva de $150 \mu\text{m Al}_2\text{O}_3$, vistas de lado e topo.

Na *Tabela 3.4* encontram-se as condições de trabalho utilizadas para cada tipo de escova a estudar. Para o trabalho apenas foram estudadas velocidades de 4500, 6000 e 7500 RPM para tempos de 5, 15 e 30 s. Velocidades inferiores a 4500 RPM não foram implementadas uma vez que quando exercida carga sobre a superfície metálica a escova era travada no seu movimento rotativo.

Tabela 3.4: Condições de escovagem utilizadas para as escovas de nylon abrasivo e lamela de manta abrasiva.

Escova	Tempo (s)	Velocidade de Rotação (RPM)		
		4500	6000	7500
Nylon abrasivo com $80 \mu\text{m Al}_2\text{O}_3$	30	¥ ✕	¥ ✕	/
	15	¥ ✕	¥ ✕	/
Nylon abrasivo com $125 \mu\text{m Al}_2\text{O}_3$	30	¥ ✕	✕	/
	15	¥ ✕	¥ ✕	¥ ✕
	5	/	¥ ✕	¥ ✕
Lamelas de manta abrasiva com $150 \mu\text{m Al}_2\text{O}_3$	30	¥ ✕	¥ ✕	¥
	15	✕	¥ ✕	¥ ✕
	5	/	✕	¥ ✕

Nota: ¥ S235 JR e ✕ S355 JR

3.2.4. Ablação a Laser

Para enquadrar o processo de ablação a laser no trabalho de investigação foi utilizado um laser nanopulsado de Nd-YAG (*Fig. 3.5*) que emite um feixe laser no infravermelho, com um comprimento de onda de 1064 nm. A escolha do laser teve por base a literatura, mais precisamente o trabalho de investigação de Chen et al ^[35]. O aparelho de laser (Rofin Starmark SMP 100 II) usado existe no departamento de Física da Universidade de Aveiro e apresenta as seguintes especificações:

- Potência (P) de 0 a 150 W;
- Frequência (f) de 4 a 15 KHz;
- Corrente de Pulso de 20 a 30 A;
- Distância focal (d_f) 10 cm;
- Velocidade do laser (V_{laser}) até 1000 mm/s;
- Velocidade da chapa (V_{chapa}) até 5 mm/s.

O movimento das chapas ao longo do ensaio foi garantido através de uma superfície que era movimentada através de um motor Thorlab MTS 50/M-Z8. Ao laser encontra-se acoplado um sistema de extração de sujidade do material ejetado da superfície metálica.



Fig. 3.5: Laser Nd-YAG (1064 nm).

Para avaliar o grau de remoção da calamina foram utilizadas condições de trabalho na qual foi possível ver a influência do número de passagens, velocidade da chapa (mm/s), frequência (KHz) e potência do pulso laser (A). Na *Tabela 3.5* encontram-se os parâmetros testados com o equipamento a laser.

Tabela 3.5: Parâmetros utilizados com o equipamento a laser.

Nº de passagens	Chapa	Corrente (A)	Frequência (KHz)	Velocidade da Chapa (mm/s)	Velocidade do feixe (mm/s)
5	S235 JR	25	20	5	1000
	S355 JR				
1	S235 JR	25	20	1	1000
		27,5		5	
	S355 JR	20	20	1,67	1000
		25		5	

Após a decapagem a laser foi feita uma limpeza de ultrassons em etanol durante 5 min para eliminar possíveis vestígios localizados na superfície tratada, gerados durante o seu manuseamento.

Capítulo 4

Resultados e Discussão

4.1. Caracterização da Calamina Libertada das Chapas

A Fig. 4.1 a) mostra o difratograma de raios-X (DRX) da calamina recolhida junto a uma das aplanadoras da empresa, resultante de diversas qualidades de chapa de aço-carbono. Picos indicativos da presença de magnetite (Fe_3O_4) e hematite (Fe_2O_3) foram identificados, sendo a fase Fe_3O_4 o principal constituinte da calamina.

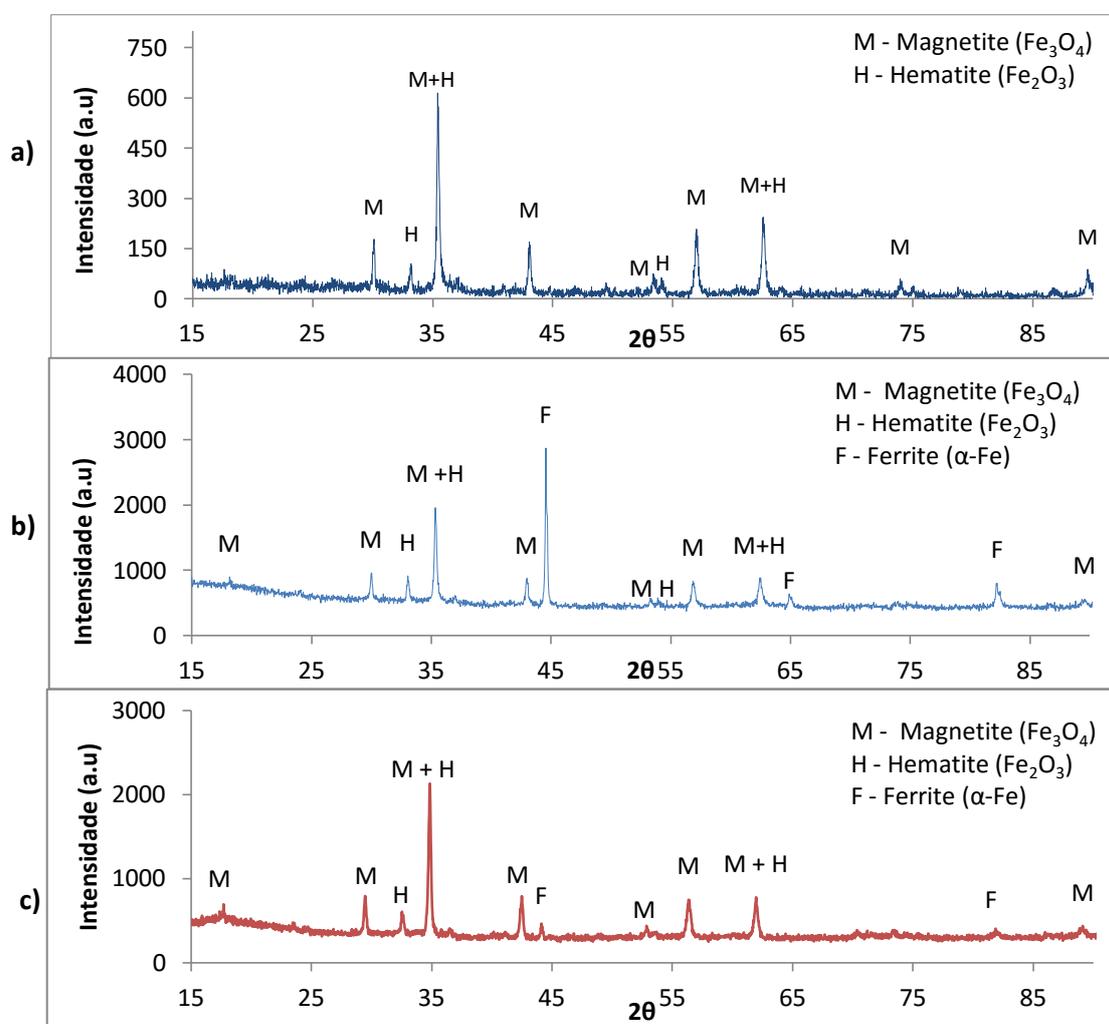


Fig. 4.1: Difratogramas de raios-X da calamina proveniente a) de várias qualidades de chapas de aço-carbono e da chapa b) S235 JR e c) S355 JR.

Da análise dos resultados da distribuição granulométrica (*Fig. 4.2*) da calamina proveniente de várias chapas é observado que o diâmetro das partículas varia entre 0,04 a 340 μm , com um valor médio de 59 μm .

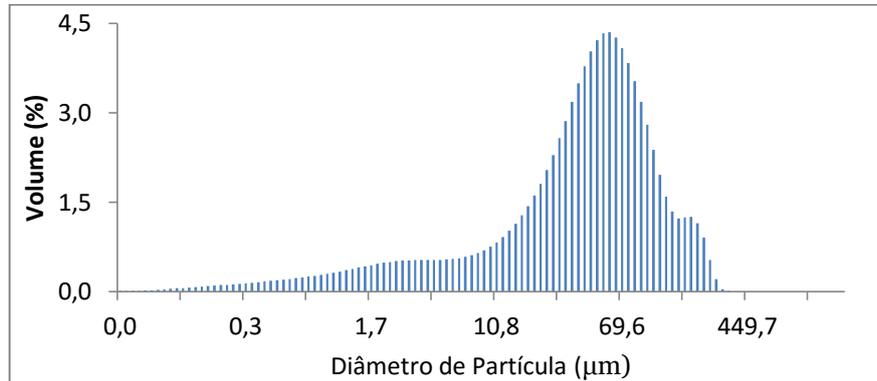


Fig. 4.2: Distribuição granulométrica das partículas da calamina proveniente de várias chapas.

4.2. Caracterização da Calamina nas Chapas S235 JR e S355 JR

A partir de uma avaliação do estado das superfícies é visto que ambas as qualidades de chapa apresentam na sua superfície calamina com uma tonalidade acinzentada (*Fig.4.3*), tratando-se portanto de uma oxidação de grau A (*Tabela 2.4*). Desta forma é de se esperar que a calamina seja de difícil remoção. No entanto, não se colocou em causa a hipótese de utilizar o intemperismo como processo para promover a conversão da calamina antes das técnicas de decapagem mecânica e física, uma vez que se pretende encontrar um método de remoção da calamina rápido e eficiente que não coloque em causa o “lead time” já existente nas linhas de produção da empresa.

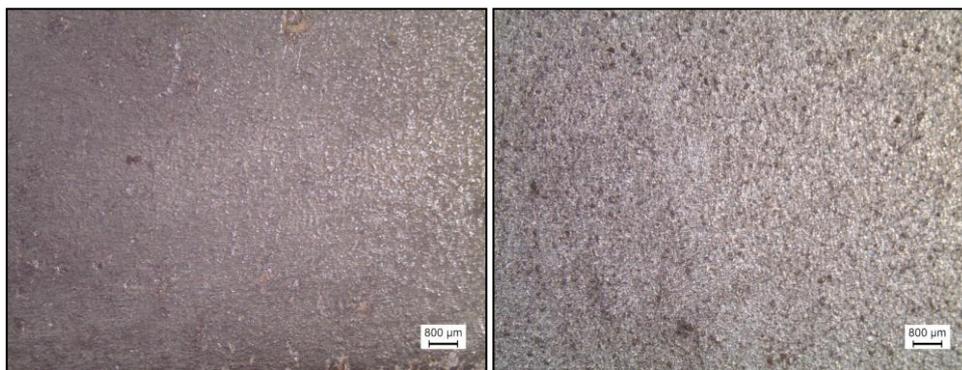


Fig. 4.3: Imagens obtidas por lupa da superfície das chapas S235 JR (esquerda) e S355 JR (direita) antes dos processos de decapagem mecânica e física.

Da análise do DRX das chapas S235JR e S355 JR (*Fig. 4.1*) é evidenciado que Fe_3O_4 e Fe_2O_3 fazem parte da composição química da calamina em ambas as chapas, sendo a magnetite a fase maioritária. A presença de picos de $\alpha\text{-Fe}$, mais intensos na chapa S235 JR, poderá estar associada ao substrato de aço e/ou a uma estrutura eutetóide, consistindo em $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \alpha\text{-Fe}$. A verificação de uma estrutura eutetóide comprova que o arrefecimento da chapa foi realizado de forma lenta, pois houve tempo suficiente para a decomposição de FeO .

Recorreu-se ainda à espectroscopia de energia dispersiva (EDS) acoplada ao microscópio eletrónico de varrimento (SEM) para identificar quais os elementos químicos presentes na superfície nas chapas de aço-carbono antes da realização dos processos de decapagem. Deste modo, através da *Fig. 4.4* verifica-se que os elementos químicos detetados são o Fe, O e C. No entanto, dos 3 elementos presentes na amostra o O é aquele que vai ganhar relevância para a análise o grau de remoção da calamina após os processos de decapagem, uma vez que foi visto no *Capítulo 2* que a concentração de O diminui à medida que se aproxima do substrato. Logo, a sua ausência ou redução nos espectros EDS após processos de decapagem mecânica e física remete para a remoção do filme de óxidos.

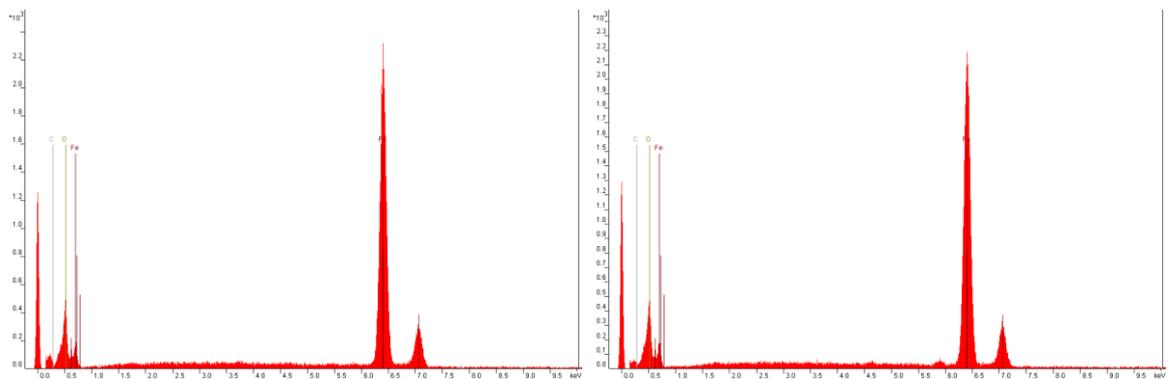


Fig. 4.4: Espectros EDS das chapas S235 JR (esquerda) e J355 JR (direita) antes dos processos de decapagem mecânica e física.

Através das microestruturas observadas por microscopia ótica (OM) (*Fig. 4.5*) é possível constatar que a espessura da calamina não é igual em ambas as chapas. Na chapa S235 JR observa-se uma calamina mais espessa, porosa e irregular do que na chapa S355 JR. De um modo geral, a espessura da calamina é função da temperatura, do tempo de processo de laminagem, das condições de arrefecimento, da atmosfera e do tipo de aço. Os parâmetros utilizados na laminagem destas chapas são desconhecidos, pois os fornecedores não dão esse tipo de informação à Plafesa. Relativamente à composição do aço, um maior teor em carbono favorece a

formação de monóxido de carbono na interface calamina-aço, retardando a cinética de crescimento da calamina^[12]. Deste modo, dado que o aço S235 JR tem menor teor em carbono, é de esperar que a taxa de crescimento e a espessura final da camada oxidada seja superior à do aço S355 JR.

Também através das microestruturas observadas por SEM (*Fig. 4.6*) das chapas em secção se constata que a espessura da calamina é inferior a 20 µm em ambos os casos, com valores de cerca de 17 e 11 µm, respetivamente para as chapas S235 JR e S355 JR. Estas espessuras vêm reforçar o uso de processos de decapagem mecânica ao invés de processos químicos, uma vez que no *Capítulo 2* se indicou que para espessuras superiores a 10 µm a decapagem mecânica é recomendada como um método de remoção da calamina.

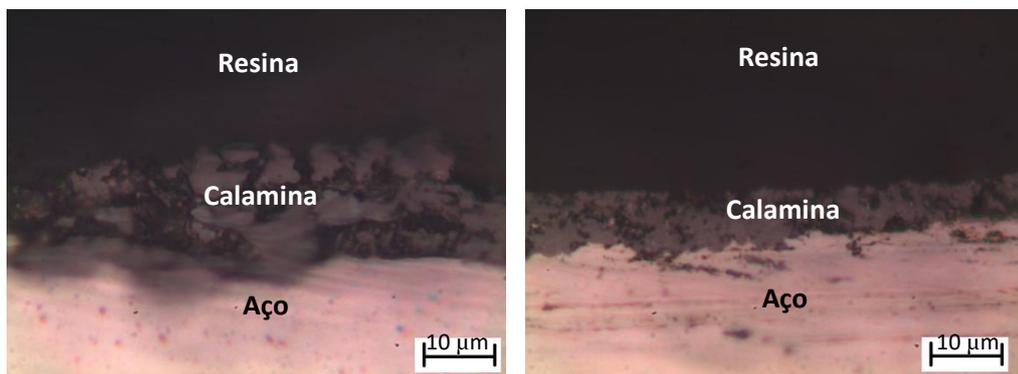


Fig. 4.5: Microestruturas obtidas por OM em secção das chapas S235 JR (esquerda) e S355 JR (direita).

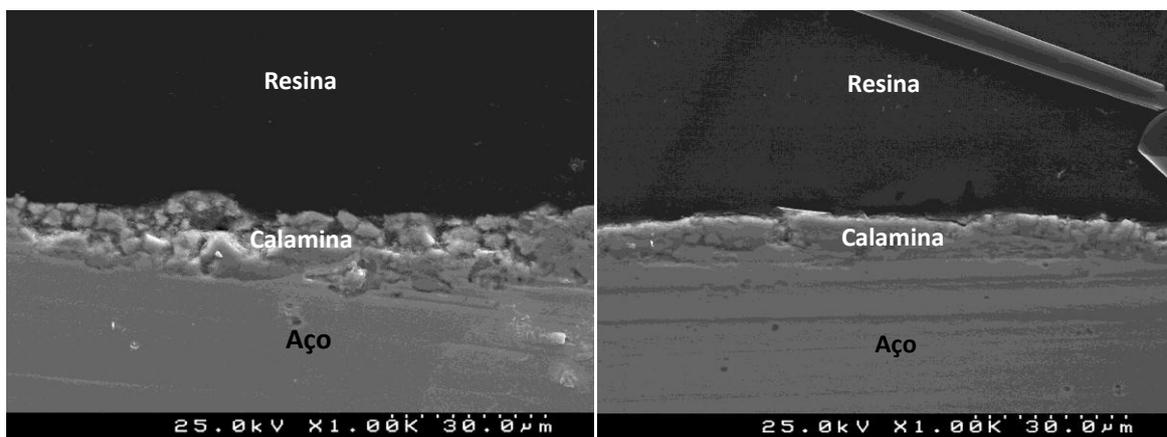
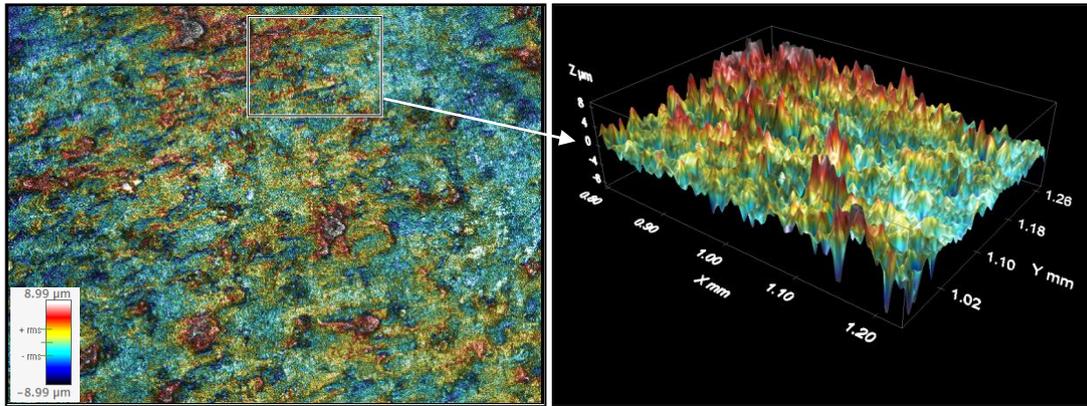


Fig. 4.6: Microestruturas obtidas por SEM em cross-section das chapas S235 JR (esquerda) e S355 JR (direita).

As imagens obtidas por OM e SEM permitem constatar que o filme de óxidos não se apresenta distribuído de forma regular em toda a superfície do aço. A técnica de perfilometria ótica 3D

mostra a existência de saliências e reentrâncias na superfície metálica em ambas qualidades de chapa (Fig. 4.7), sendo assim entregues aos seus clientes.

Chapa S235 JR



Chapa S355 JR

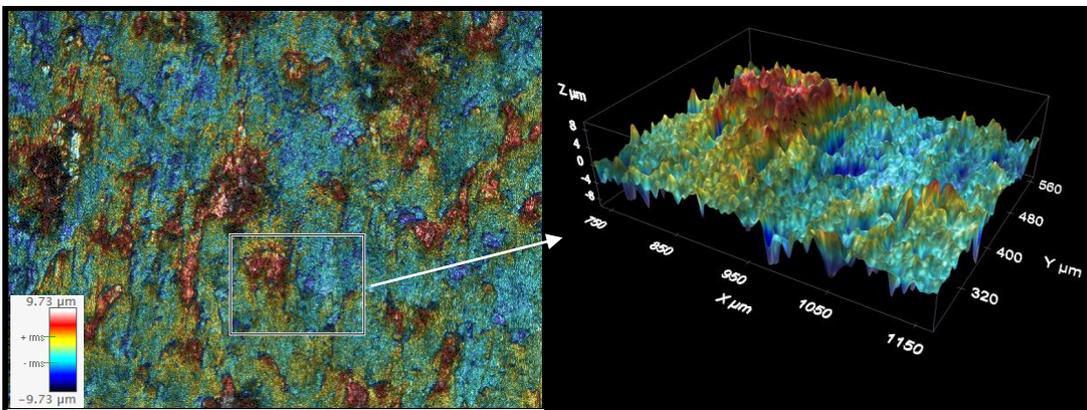


Fig. 4.7: Imagens obtidas por perfilometria ótica 3D das chapas S235 JR (cima) e S355 JR (baixo).

Através da Tabela 4.1 verifica-se que os parâmetros de rugosidade da calamina não diferem muito de uma chapa para a outra. Apesar de S_a ser mais reduzido na chapa S235 JR, os valores de S_p e S_v são mais altos do que na chapa S355 JR.

Tabela 4.1: Parâmetros de rugosidade superficial das chapas S235 JR e S355 JR antes dos processos de decapagem mecânica e física.

Parâmetros (μm)	Chapa	
	S235 JR	S355 JR
S_a	2,07	2,38
S_q	3,00	3,24
S_p	59,62	56,19
S_v	63,73	45,50

4.3. Caracterização das Chapas Após o Jateamento Erosivo por Via Seca

4.3.1. Agente Erosivo 50 μm Al_2O_3

A análise das áreas decapadas por jateamento erosivo com partículas de alumina (Figs. 4.8 e 4.9), mostra que as camadas de óxidos apresentam níveis de adesão distintos nas duas qualidades de chapa. Apesar de a diferença não ser muito significativa, a calamina é mais facilmente removida na chapa S235 JR, na qual as áreas atacadas são mais definidas e ligeiramente maiores do que na chapa S355 JR para as mesmas condições de ensaio.

Na Fig. 4.8 observa-se que para tempos de jateamento de 30 s a área atacada da chapa S235 JR mantém-se praticamente inalterada ao reduzir-se o fluxo de agente erosivo de 5 para 3 g/min. Tal resultado revela um filme não muito aderente ao substrato e de fácil remoção mecânica. Já na chapa S355 JR são notórias as diferenças na área atacada ao passar-se de 5 para 3 g/min, o que indica tratar-se de um filme de óxidos mais difícil de remover. Ainda, comparando as áreas atacadas em função do tempo de bombardeamento, nas Figs. 4.8 e 4.9 observa-se que para tempos de 30 s a área atacada torna-se mais definida do que para 15 s em ambas as qualidades de chapa.

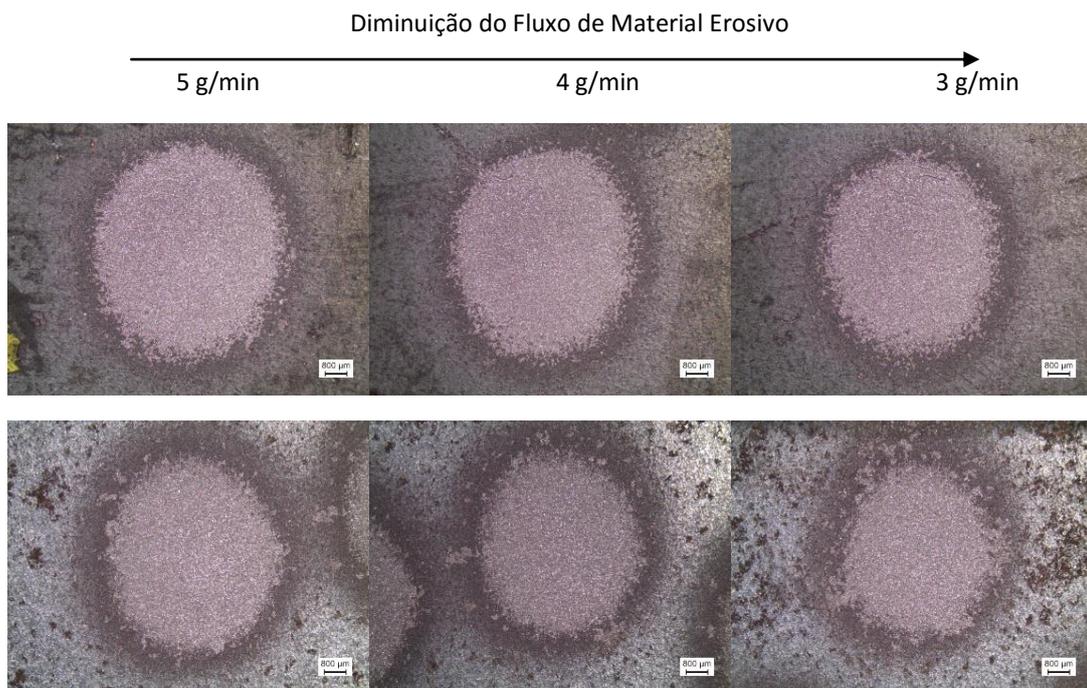


Fig. 4.8: Imagens obtidas por lupa das áreas decapadas durante 30 s das chapas S235 JR (cima) e S355 JR (baixo) a 2,80 bar com fluxo de material erosivo (Al_2O_3) de 5, 4 e 3 g/min.

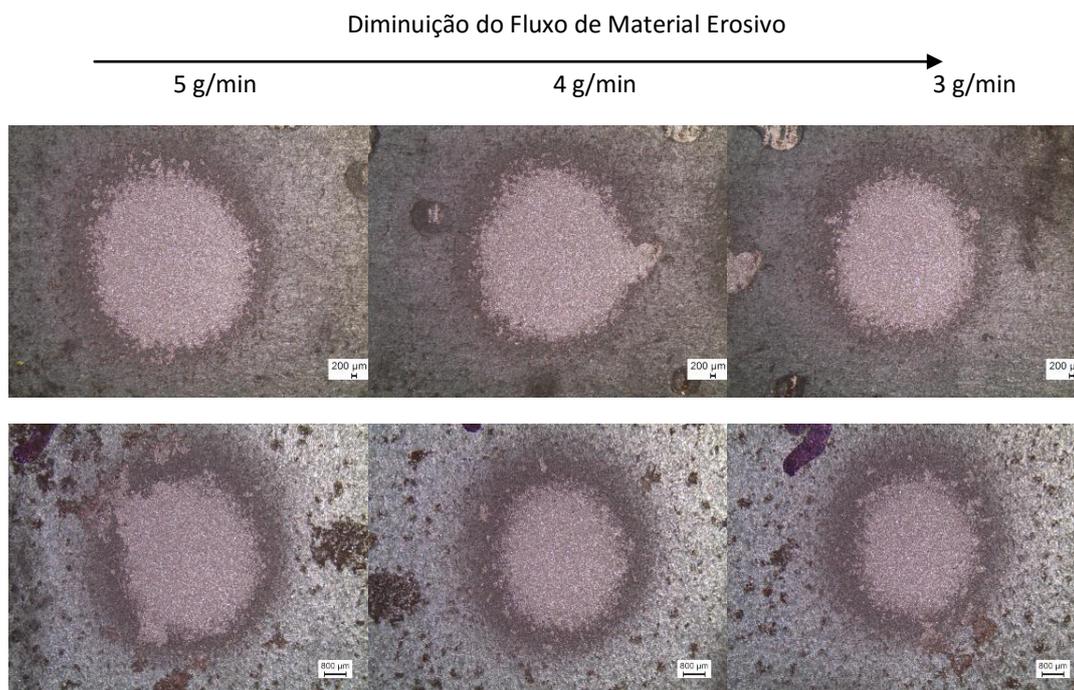


Fig. 4.9: *Imagens obtidas por lupa das áreas decapadas durante 15 s das chapas S235 JR (cima) e S355 JR (baixo) a 2,80 bar com fluxo de material erosivo (Al_2O_3) de 5, 4 e 3 g/min.*

Resultados de EDS (*Fig. 4.10*) comprovam remoção da calamina em ambas as qualidades de chapa quando utilizado tempos de jateamento de 30 e 15 s para um fluxo de material erosivo de 3 g/min, uma vez que foi detetada uma redução da quantidade de O na zona decapada quando se compara com o seu teor nas superfícies originais (*Fig. 4.4*). A presença deste elemento químico mesmo após a decapagem está associada à incrustação de partículas do erodente Al_2O_3 , pois o Al é detetado nos espectros após o jateamento. Este efeito é mais acentuado para tempos de jateamento de 30 s para os quais os picos de Al e O são mais intensos do que para 15 s.

Ainda comparando os espectros das chapas S235 JR e S355 JR, antes e após o jateamento, é possível observar que a eficiência de remoção é praticamente igual em ambas as qualidades nas mesmas condições de ensaio.

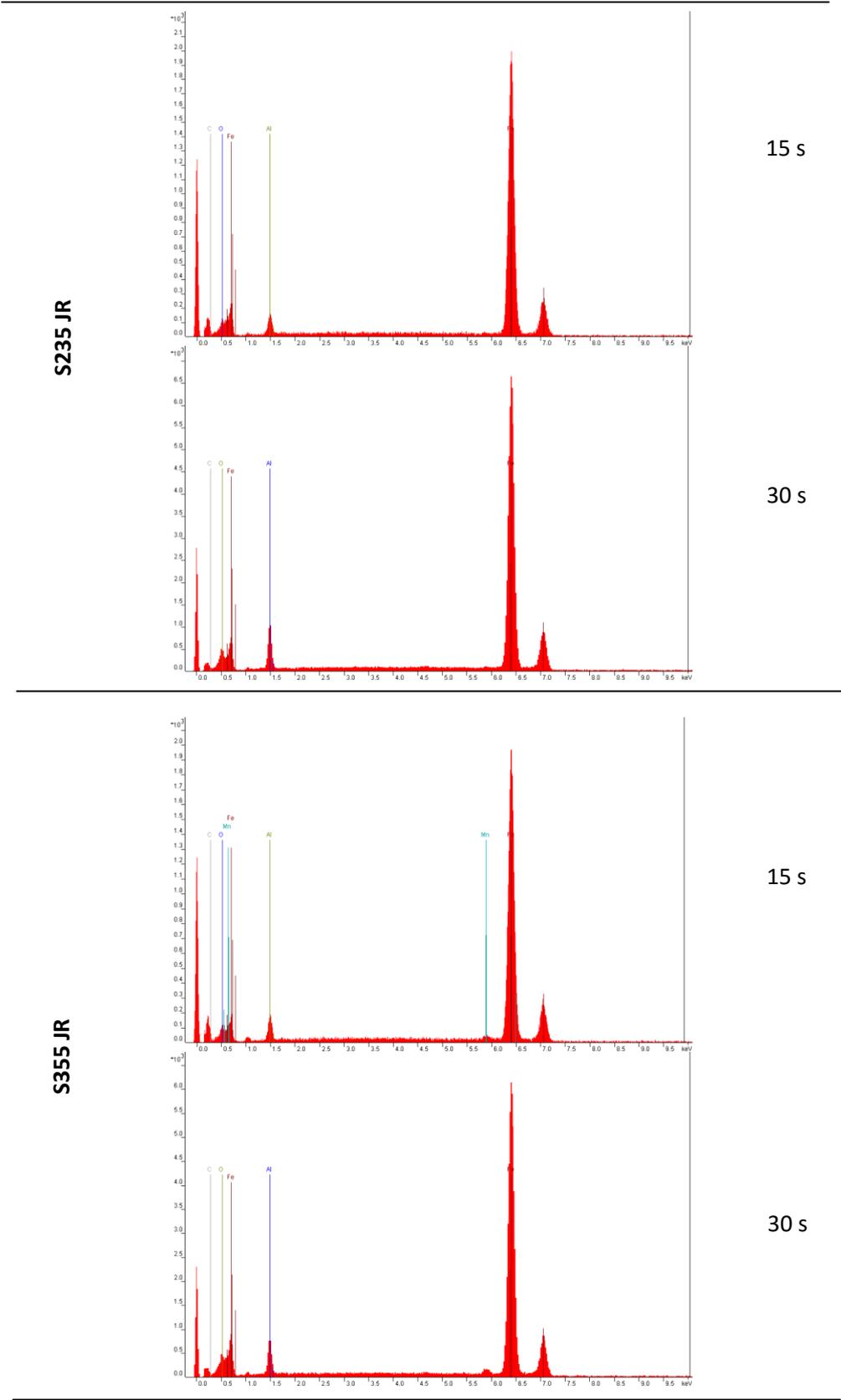


Fig. 4.10: Análise de espectro EDS das chapas S235 JR e S355 JR após um jateamento (Al_2O_3) de 15 e 30 s, com fluxo de 3 g/min.

Imagens obtidas por perfilometria ótica 3D das superfícies metálicas jateadas com $50\ \mu\text{m}\ \text{Al}_2\text{O}_3$ durante 15 e 30 s (Fig. 4.11 e 4.12) mostram a formação de superfícies com mais saliências e reentrâncias nas chapas S235 JR e S355 JR, quando comparada com as originais (Fig. 4.7). Zonas mais altas, representadas a vermelho, muito provavelmente poderão corresponder a material erosivo que ficou incrustado no substrato durante a prática de jateamento.

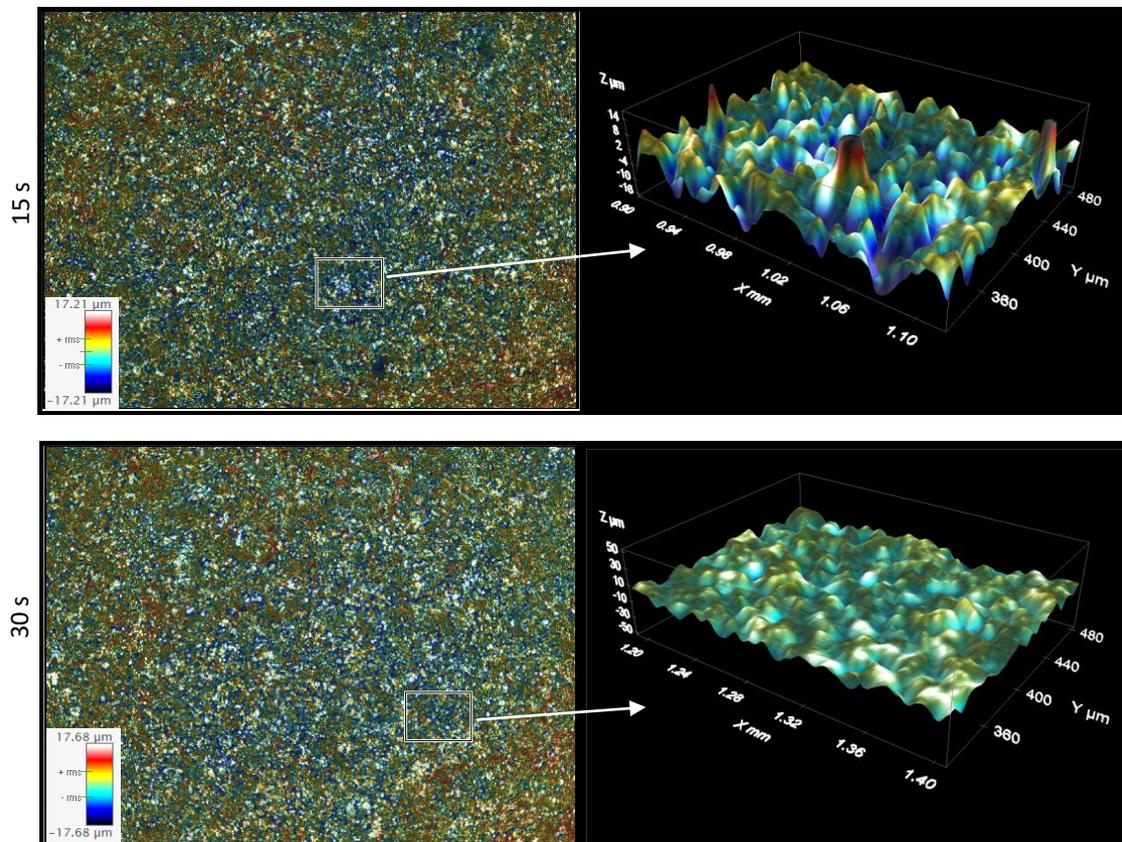


Fig. 4.11: Imagens obtidas por perfilometria ótica 3D da chapa S235 JR após um jateamento (Al_2O_3) de 15 s (cima) e 30 s (baixo) com um fluxo de 3 g/min.

Para uma avaliação mais precisa da rugosidade, na *Tabela 4.2* apresentam-se os parâmetros de rugosidade superficial de ambas as chapas correspondentes às imagens topográficas das *Figs. 4.11 e 4.12*. Os valores obtidos para um jateamento de 15 s mostram a existência de um aumento de S_a e S_q praticamente de 2x em ambas as chapas relativamente aos valores originais (*Tabela 4.1*). Para 30 s jateamento poder-se-ia esperar um aumento da rugosidade em ambas as chapas, uma vez que ficam mais tempo expostas à ação mecânica. No entanto, os valores da *Tabela 4.2* mostram que os valores de S_a se mantêm praticamente inalterados, enquanto que os valores de S_q diminuem para 30s de jateamento. Este resultado revela uma uniformização da topografia para tempos mais elevados.

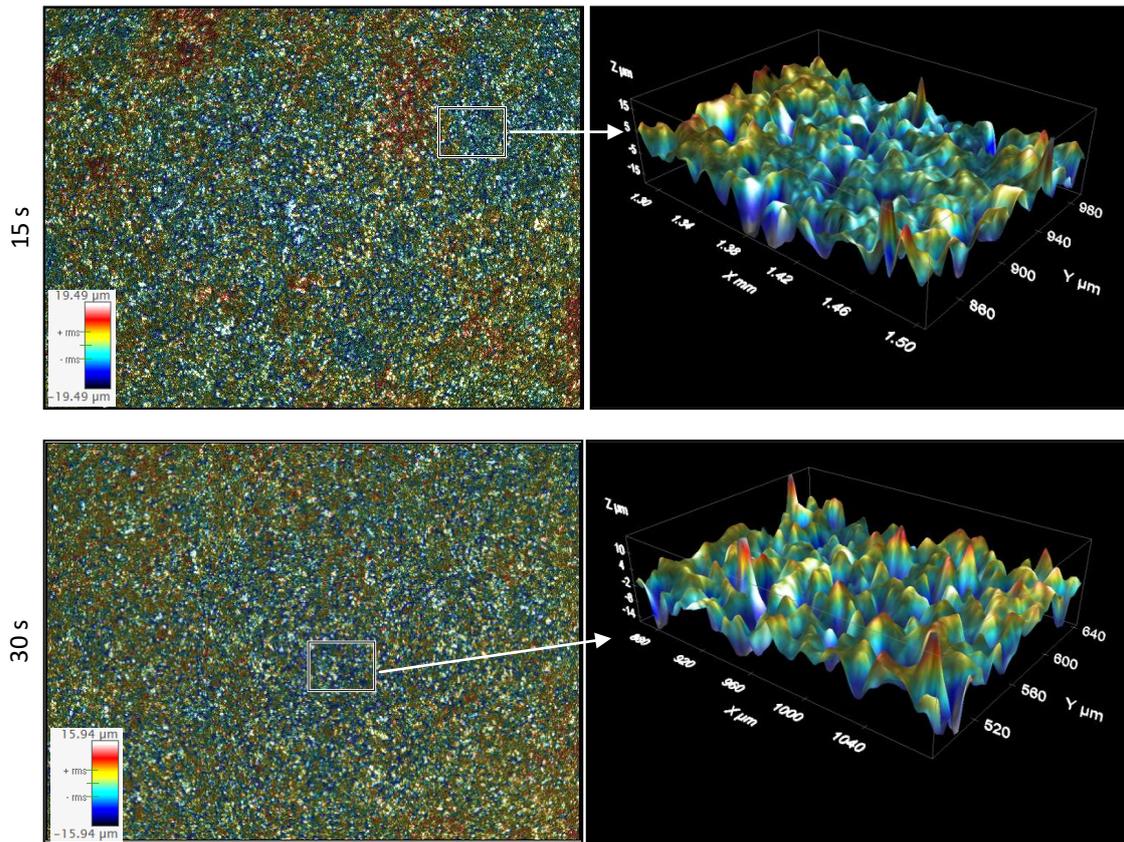


Fig. 4.12: Imagens obtidas por perfilometria ótica 3D da chapa S355 JR após um jateamento (Al_2O_3) de 15 s (cima) e 30 s (baixo) com um fluxo de 3 g/min.

Tabela 4.2: Parâmetros de rugosidade superficial das chapas S235 JR e S355 JR após decapagem por jateamento erosivo com partículas de alumina.

Parâmetros (μm)	Tempo de jateamento (s)			
	15		30	
	S235 JR	S355 JR	S235 JR	S355 JR
S_a	4,71	4,71	4,46	4,70
S_q	6,21	6,31	5,57	5,96
S_o	54,10	64,53	20,89	39,95
S_v	31,41	30,14	34,00	26,31

4.3.2. Agente Erosivo 50 μm SiC

A análise das áreas decapadas por jateamento erosivo com partículas de SiC (Figs. 4.13 e 4.14) mostra que este agente erosivo tem uma ação mais agressiva do que a Al_2O_3 , revelando limites da área atacada para tempos de 30 e 15 s muito mais bem definidos do que nas Figs. 4.8. e 4.9. Estes resultados permitem deduzir que neste caso a remoção da calamina é feita de forma mais rápida com 50 μm de SiC. Tal como aconteceu para 50 μm de Al_2O_3 , a menor espessuras da camada de óxidos na chapa S355 JR não determina uma maior facilidade de remoção, pois a área decapada é maior na chapa S235 JR. Isto deve-se, provavelmente, ao facto de neste último tipo de aço a calamina ser mais porosa e irregular, como acima se descreveu.

Relativamente à influência do tempo de bombardeamento e fluxo de material erosivo, a análise dos resultados revela semelhanças com o comportamento sob o erodente Al_2O_3 (50 μm).

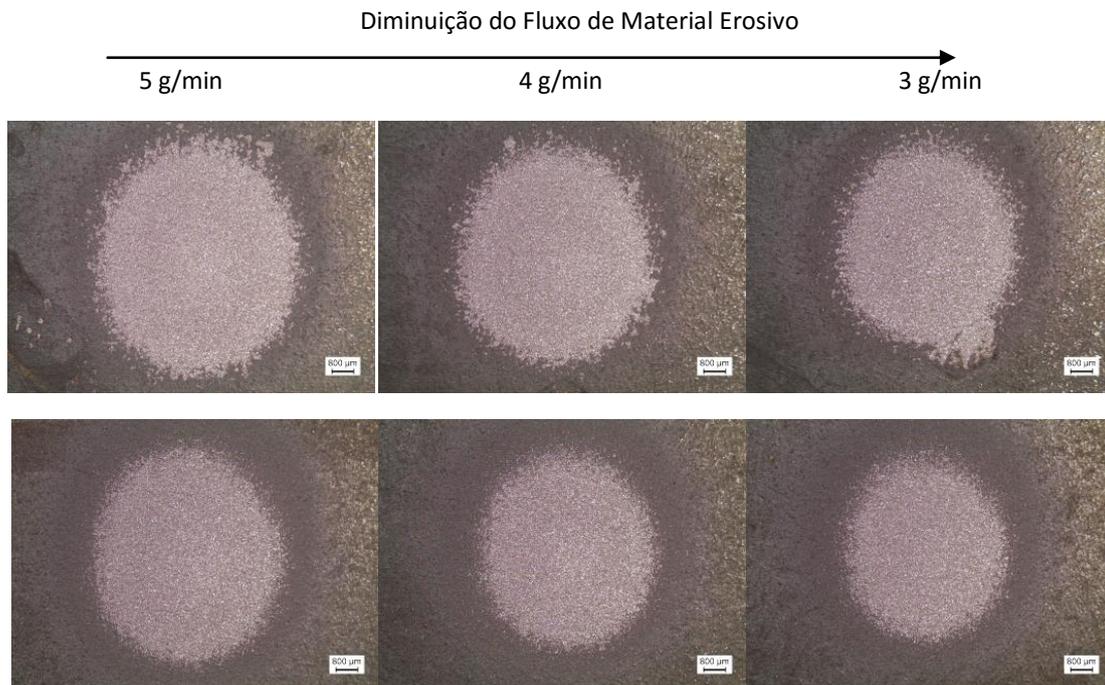


Fig. 4.13: *Imagens obtidas por lupa das áreas decapadas durante 30 s das chapas S235 JR (cima) e S355 JR (baixo) a 2,80 bar com fluxo de material erosivo (SiC) de 5, 4 e 3 g/min.*

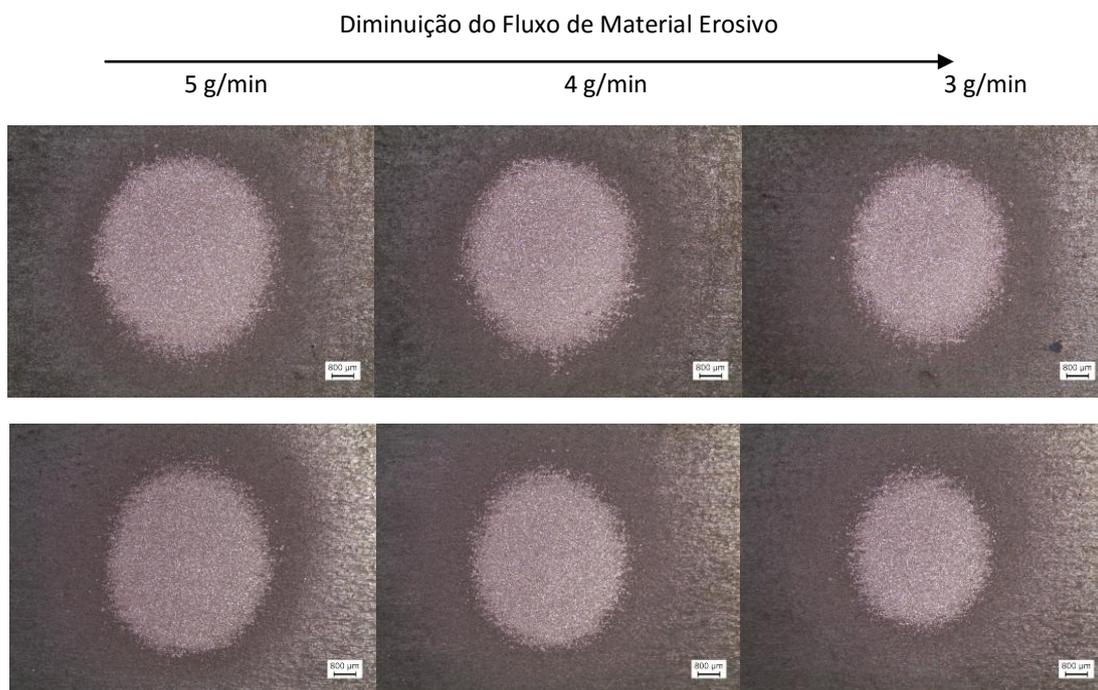


Fig. 4.14: *Imagens obtidas por lupa das áreas decapadas durante 15 s das chapas S235 JR (cima) e S355 JR (baixo) a 2,80 bar com fluxo de material erosivo (SiC) de 5, 4 e 3 g/min.*

Resultados obtidos por EDS (*Fig. 4.15*) corroboram que a eficiência de remoção é praticamente total em ambas as qualidades de chapa, pois desaparece o pico de O presente nas chapas originais (*Fig. 4.4*). Neste caso, os espectros EDS revelam a presença de Si devido à incrustação das partículas erodentes.

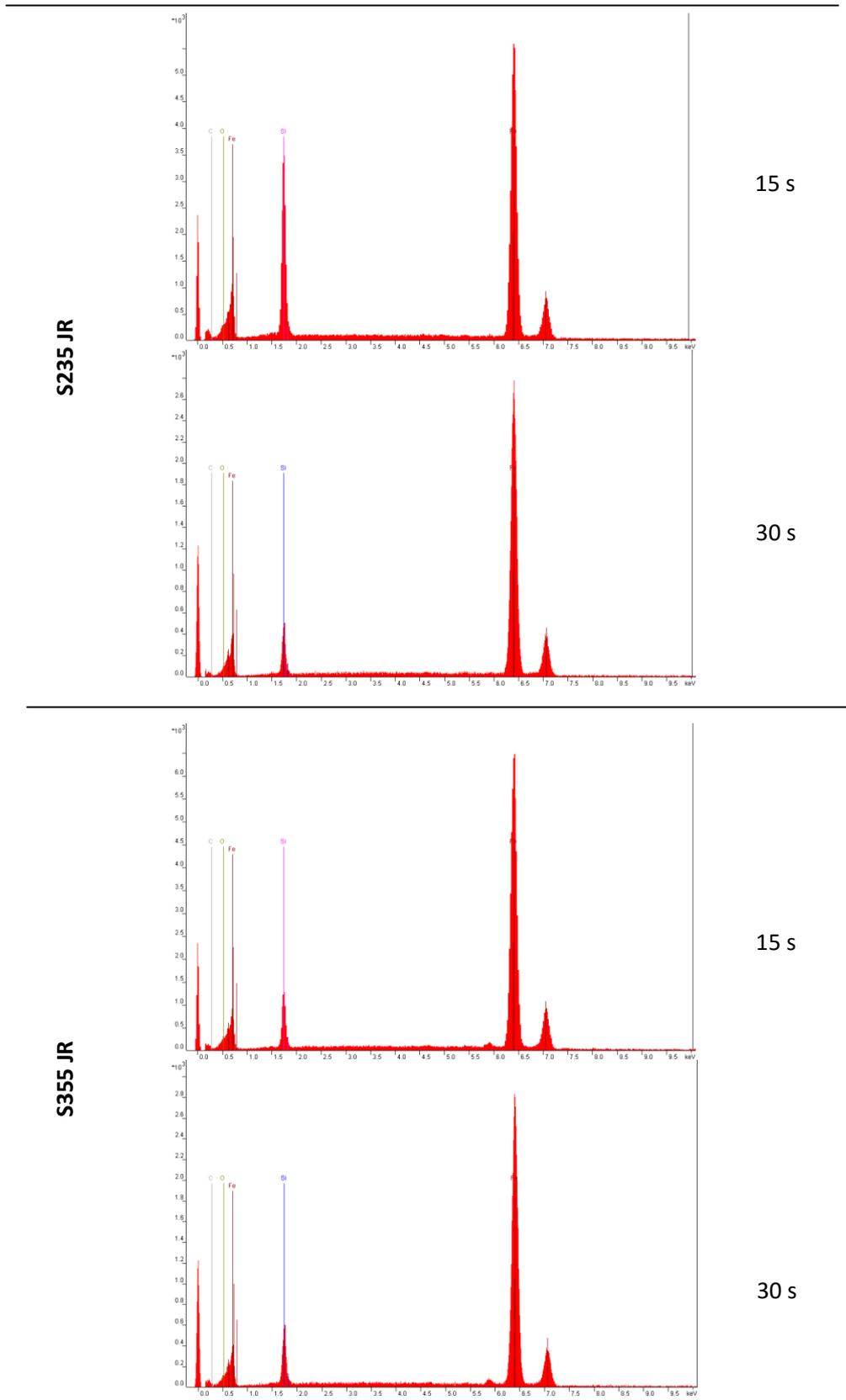


Fig. 4.15: Espectros EDS das chapas S235 JR e S355 JR após um jateamento (SiC) de 15 s e 30 s, com um fluxo de 3 g/min.

Da análise topográfica das superfícies metálicas jateadas com 50 μm SiC durante 15 e 30 s (Figs. 4.16 e 4.17) é visto que a ação deste erodente não difere muito das partículas de 50 μm Al_2O_3 . Desta forma, a análise dos parâmetros de rugosidade (Tabela 4.3) obtidos seguiram a mesma linha de raciocínio que se considerou para o erodente 50 μm Al_2O_3 .

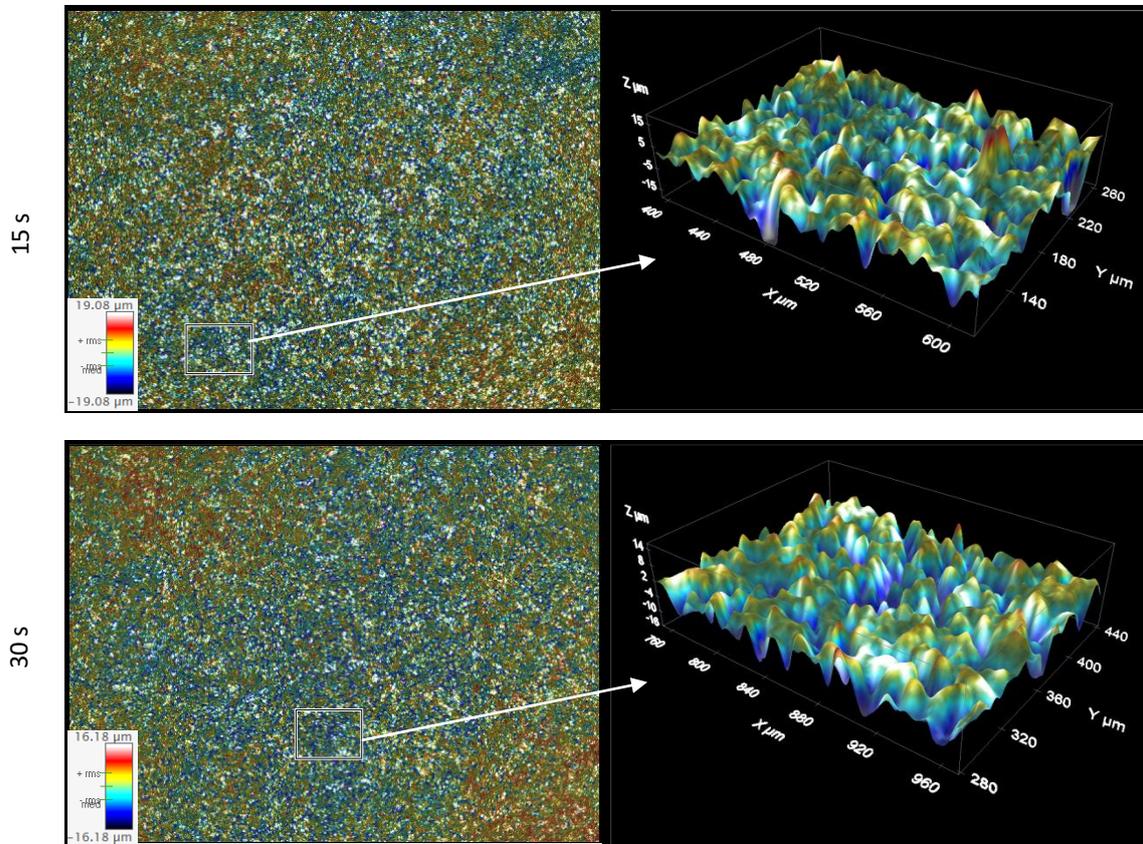


Fig. 4.16: Imagens obtidas por perfilometria ótica 3D da chapa S235 JR após um jateamento (SiC) de 15 s (cima) e 30 s (baixo) com um fluxo de 3 g/min.

Neste caso também é visto um aumento de S_a praticamente de 2x em ambas as chapas para tempos de jateamento de 15s, não havendo alterações significativas quando se aumenta para 30 s.

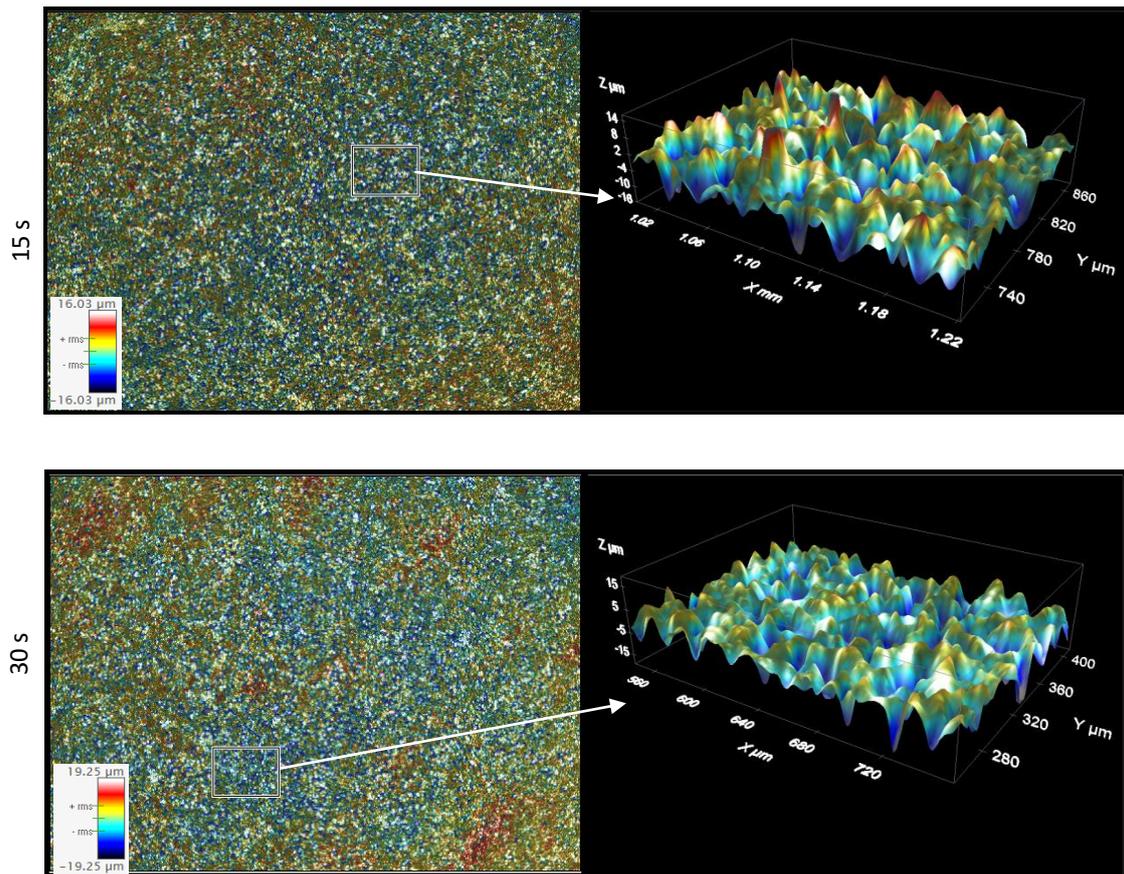


Fig. 4.17: Imagens obtidas por perfilometria 3D da chapa S355 JR após um jateamento (SiC) de 15 s (cima) e 30 s (baixo) com um fluxo de 3 g/min.

Tabela 4.3: Parâmetros de rugosidade superficial das chapas S235 JR e S355 JR após decapagem por jateamento erosivo com partículas de carboneto de silício.

Parâmetros (μm)	Tempo de jateamento (s)			
	15		30	
	S235 JR	S355 JR	S235 JR	S355 JR
S_a	4,72	4,79	4,27	4,74
S_q	6,55	6,16	5,31	6,05
S_p	49,78	42,16	14,02	12,50
S_v	44,87	29,25	24,31	40,65

4.4. Caracterização das Chapas Após o Jateamento com Água a Alta Pressão e Jateamento Erosivo por Via Húmida

Nas fotografias apresentadas na *Fig. 4.18* observa-se que após jateamento com água a alta pressão (380 bar) e velocidade de avanço do bico de injeção de 15 m/min, a remoção da calamina é insuficiente. As áreas percorridas pelo jato de água apresentam pistas avermelhadas oxidadas onde ocorreu remoção do filme de calamina. Além do mais, a aproximação do bico do jato à superfície a ser tratada pouco afetou a capacidade de remoção da calamina.

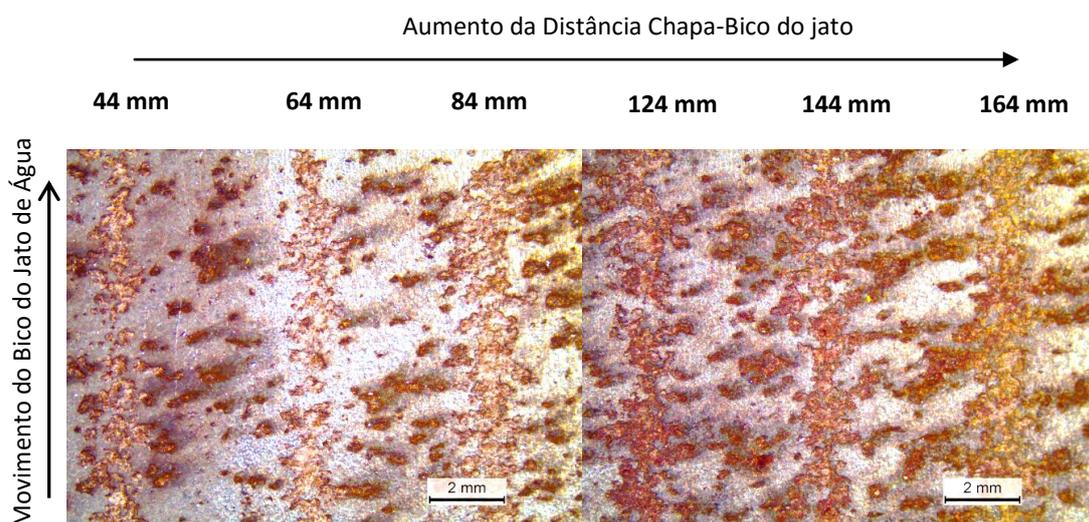


Fig. 4.18: *Imagens obtidas por lupa das áreas da chapa S235 JR decapadas com jato de água s/erodente a 380 bar, com velocidade de avanço do bico de 15 m/min, localizado a diferentes alturas da chapa.*

Ao contrário do que acontece com a distância chapa-bico, a velocidade de avanço e a pressão da água são variáveis importantes. Nas imagens da *Fig. 4.19* observa-se que a calamina é mais facilmente removida ao diminuir-se a velocidade de avanço, nas mesmas condições de pressão de impacto (380 bar), uma vez que as áreas bombardeadas pelo jato de água se tornam mais definidas e passam a ter uma cor cinza clara (note-se que neste caso as pistas foram secas imediatamente após o jateamento para evitar a oxidação do aço exposto). No entanto, para a velocidade de 0,1 m/min o jato comporta-se na prática como uma ferramenta de corte, realizando um entalhe profundo na chapa. Para a mesma velocidade (0,1 m/min), mas diminuindo a pressão de impacto para 50 bar, verifica-se uma redução acentuada no grau de remoção da calamina.

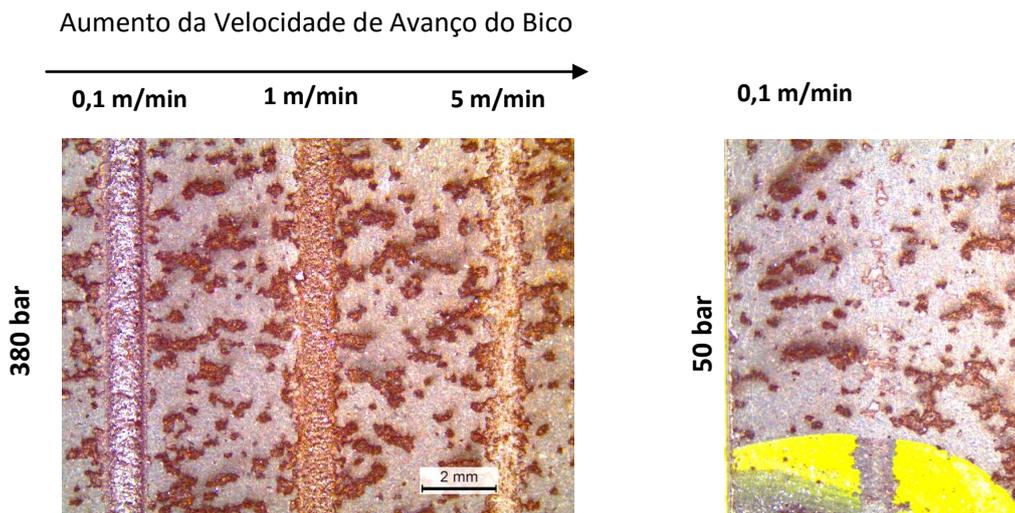


Fig. 4.19: *Imagens obtidas por lupa das áreas decapadas da chapa S235 JR s/erodente, para uma distância bico-jato de 4 mm.*

De uma forma em geral, nota-se que a realização deste tipo de decapagem mecânica coloca em causa o aspeto superficial da chapa. Além do mais, após o bombardeamento, as áreas atacadas oxidam pela água, o que determina a necessidade da utilização de inibidores de corrosão ou secagem imediata da chapa.

O aspeto das superfícies após jateamento erosivo por via húmida a uma velocidade de avanço do bico de 15 m/min é apresentado na *Fig. 4.20*. De um modo geral atinge-se um bom grau de remoção do filme. A variação do fluxo de material erosivo de 150 g/min para 250 g/min não interfere no grau de remoção. Pelo contrário, aumentando a distância bico-chapa de 4 mm para 164 mm, as dimensões da área removida e a profundidade do ataque são significativamente alteradas. Comparando as duas técnicas de jateamento por via húmida, depara-se que a incorporação de agente erosivo durante o jateamento permite alcançar maior eficiência de remoção da calamina.

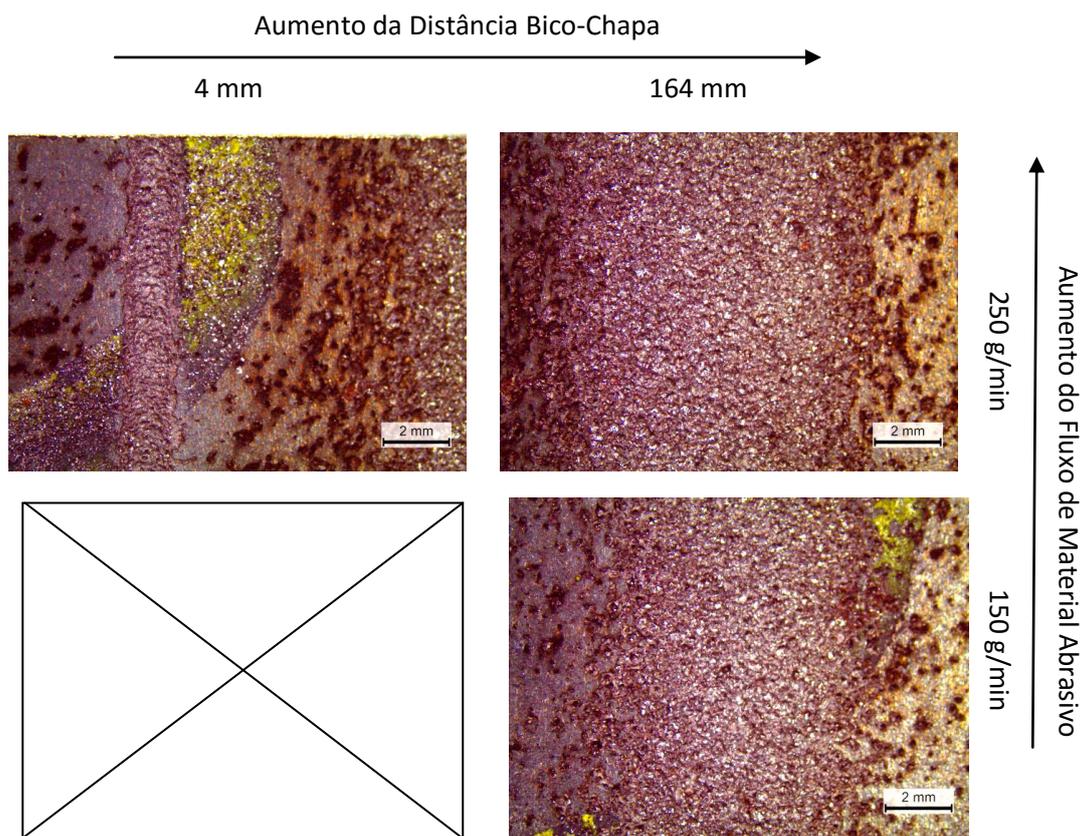


Fig. 4.20: *Imagens obtidas por lupa das áreas decapadas da chapa S235 JR após um jateamento c/erodente, a 380 bar de pressão de água e 15 m/min de velocidade de avanço do bico.*

Neste tipo de decapagem, a análise por EDS identifica elementos químicos representativos do agente erosivo utilizado ($\text{Fe}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$), além do Fe da chapa (Fig. 4.21). Logo, o pico de O apenas estará associado à incrustação de material erodente e eventualmente à oxidação pelo contato com a água.

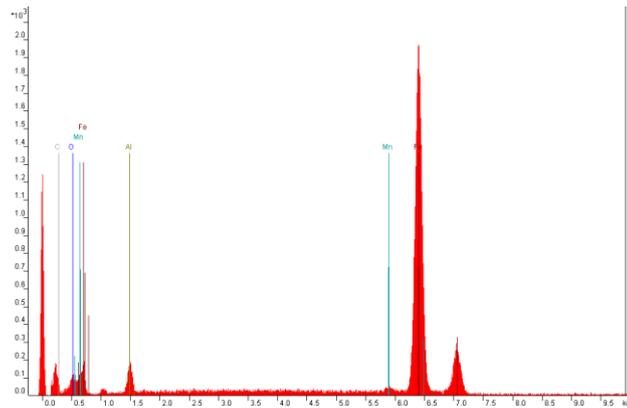


Fig. 4.21: Espectro EDS da chapa S235 JR após um jateamento c/erosivo, a 380 bar de pressão de água, 15 m/min de velocidade de avanço do bico, distância bico-chapa de 164 mm e 250 g/min de fluxo erosivo.

Da análise topográfica das superfícies jateadas apenas com água a alta pressão (Figs. 4.22 e 4.23) é possível constatar que esta técnica de decapagem mecânica não é muito eficaz na remoção da calamina. As áreas atacadas pelo jato mostram zonas com grandes saliências, associadas camadas de óxidos que não foram removidas na totalidade. Esta análise comprova que a distância bico-chapa não tem grande influência na eficiência do processo (Fig. 4.22), como anteriormente referido. Do mesmo modo, esta observação em perfilometria ótica 3D corrobora que a velocidade de avanço do bico relativamente à chapa já altera o processo (Fig. 4.23), atingindo-se elevadas profundidades de remoção mesmo do material da chapa para menor velocidade de avanço.

Os parâmetros de rugosidade compilados na Tabela 4.4 vêm comprovar a necessidade de adequar a velocidade de avanço do bico. O facto de o bico do jato permanecer mais tempo numa dada zona da chapa, ou seja, para velocidades de avanço de 1 e 0,1 m/min, faz com que os valores de S_a atinjam valores extremamente altos. Além do mais, é visto que a profundidade máxima de vale (S_v) torna-se cada vez mais acentuada.

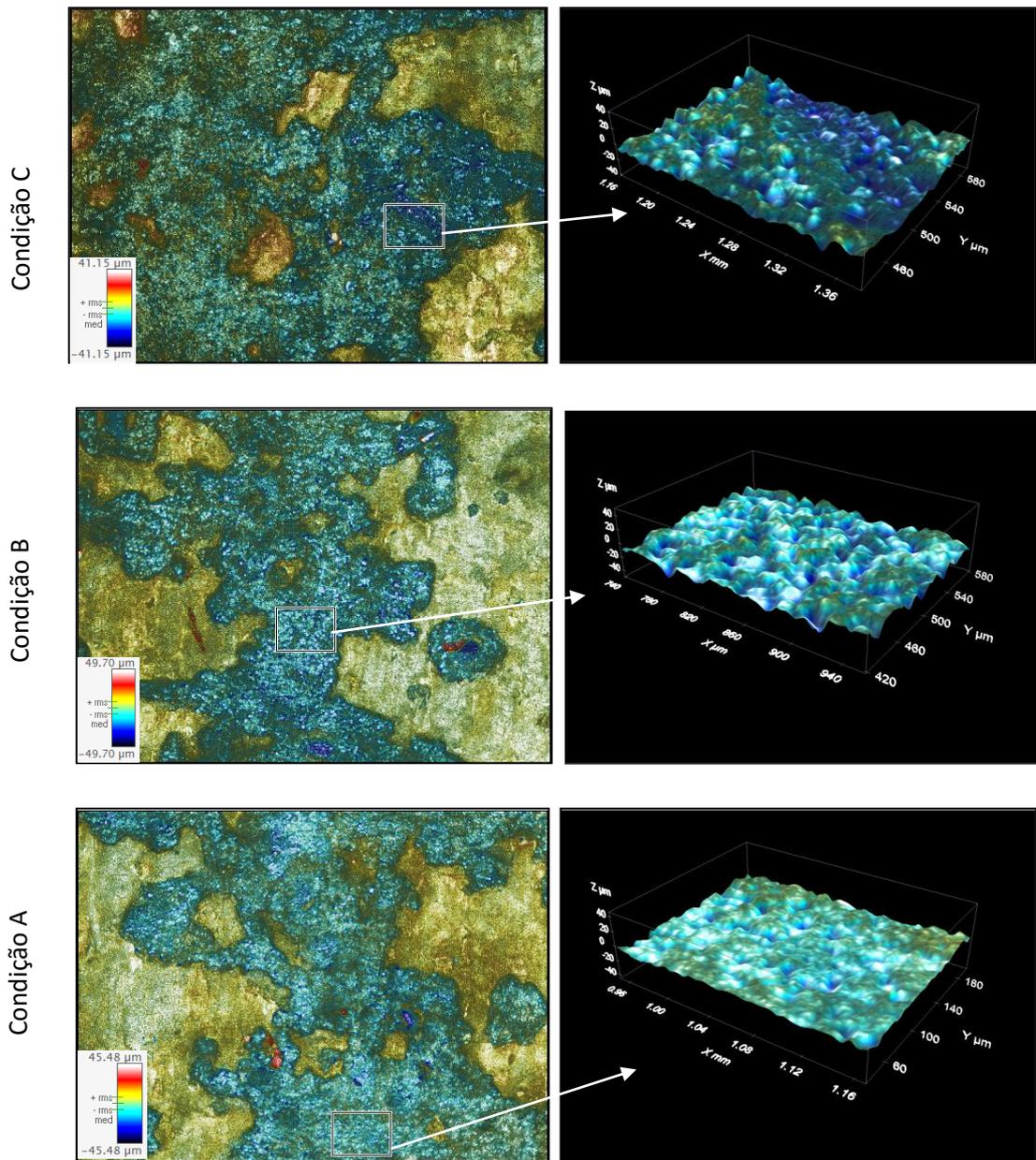


Fig. 4.22: *Imagens obtidas por perfilometria 3D da chapa S235 JR após um jateamento húmido s/erodente a 380 bar e 15 m/min de velocidade de avanço do bico, relativas às condições A (distância bico-chapa de 164 mm), B (144 mm) e C (124 mm).*

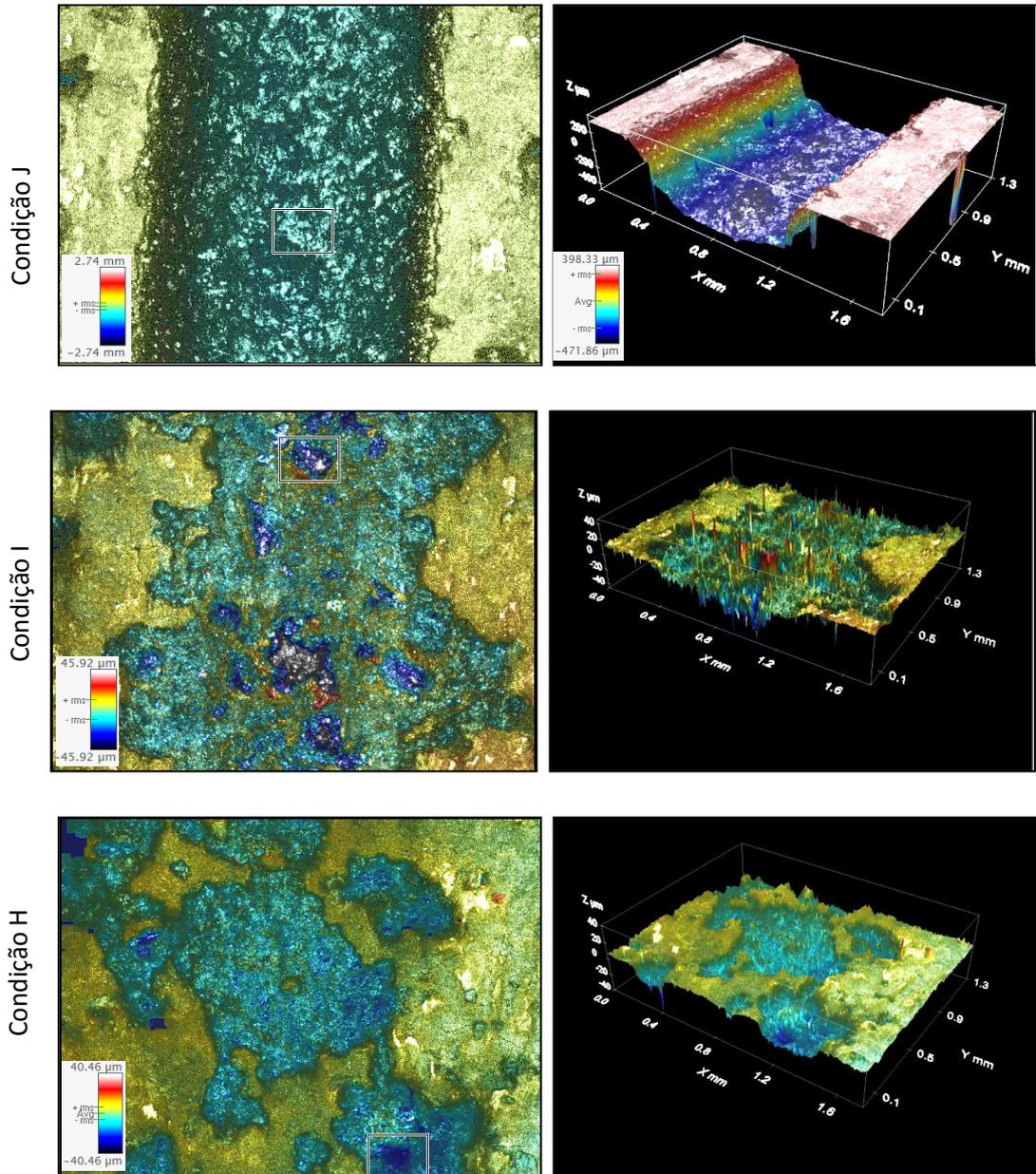


Fig. 4.23: *Imagens obtidas por perfilometria 3D da chapa S235 JR após um jateamento húmido s/erodente a 380 bar e distância bico-chapa de mm, relativas às condições H (velocidade de avanço do bico de 5 m/min), I (1 m/min) e J (0,1 m/min).*

Quando adicionado agente erosivo ao processo, os parâmetros de rugosidade superficial da chapa S235 JR tornam-se ainda mais elevados (condições M, N e O na *Tabela 4.4.*). No entanto, não se pode julgar este processo de decapagem mecânica como sendo inadequado para a obtenção de superfícies com boas propriedades mecânicas, uma vez que só houve a possibilidade de testar um erodente na qual apresentava um elevado tamanho de partícula (177 µm). Mesmo assim, variáveis como o fluxo de material erosivo e distância bico-chapa foram manipuladas para

testar o seu efeito. Desta forma, as topografias resultantes da ação mecânica nas condições M, N e O mostram que a aproximação do bico à chapa (condição O) provoca a remoção acentuada de material da chapa. No que diz respeito ao fluxo de erosivo, as topografias não mostram grandes diferenças quando utilizado um fluxo de 250 ou 150 g/min. De um modo geral, através dos valores dos parâmetros de rugosidade mostra-se que a eliminação completa da calamina (condições I, J, M, N, O) compromete a qualidade superficial da chapa.

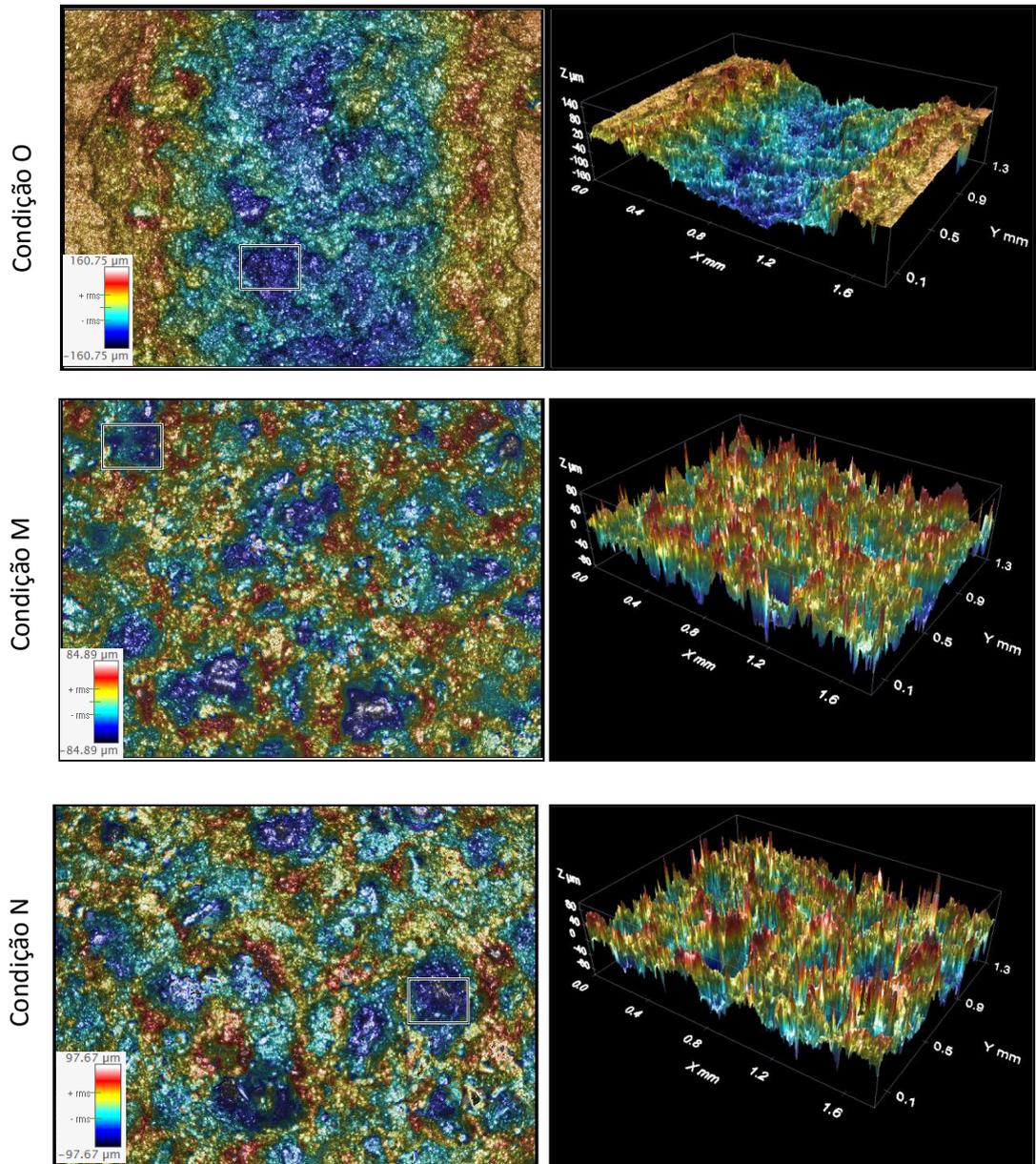


Fig. 4.24: *Imagens obtidas por perfilometria 3D da chapa S235 JR após um jateamento c/erodente relativas às condições M (distância bico-chapa 164 mm; fluxo de erodente de 250 g/min), N (164 mm; 150 g/min) e O (4 mm; 250 g/min).*

Tabela 4.4: Parâmetros de rugosidade superficial da chapa S235 JR correspondentes aos perfis de rugosidade da Fig. 4.22 à 4.24.

Condições	Parâmetros (μm)			
	S_a	S_q	S_p	S_v
A	3,23	4,35	12,77	42,774
B	4,61	5,73	14,62	27,80
C	5,05	6,05	14,87	16,59
H	4,34	5,64	16,80	16,39
I	16,47	19,60	40,74	60,80
J	18,24	22,48	48,52	88,07
M	21,60	27,57	89,57	74,55
N	19,72	27,12	165,88	67,17
O	18,36	22,33	71,94	46,74

4.5. Caracterização das Chapas Após Escovagem

4.5.1. Lamela de Manta Abrasiva de Al_2O_3

Ao contrário das técnicas anteriores, a lamela de manta abrasiva mostrou ser adequada para proporcionar bons acabamentos quando é feita a remoção da calamina. Na *Fig. 4.25* observa-se que a zona tratada passa a apresentar uma superfície lisa e espelhada. Não é muito visível a alteração de cor nestas imagens, após a decapagem mecânica, mas todas as zonas onde ocorreu remoção da calamina passaram a apresentar uma cor cinza clara (cor característica da chapa). Para ambas as qualidades de chapa, a velocidade de 4500 RPM para tempos de escovagem de 30 s é insuficiente uma vez que a remoção da calamina é muito superficial (início da remoção). Logo, para baixas velocidades seria necessário maiores tempos de escovagem. No entanto, o aumento da velocidade de escovagem para 7500 RPM permite aumentar o grau de remoção da calamina, sendo bem visível a olho nu o efeito desejado. Em ambos as qualidades de chapa, a velocidade de escovagem de 6000 RPM mostra ser adequada para o efeito pretendido, uma vez que ocorre remoção do filme de óxidos sem danificar a superfície da chapa.

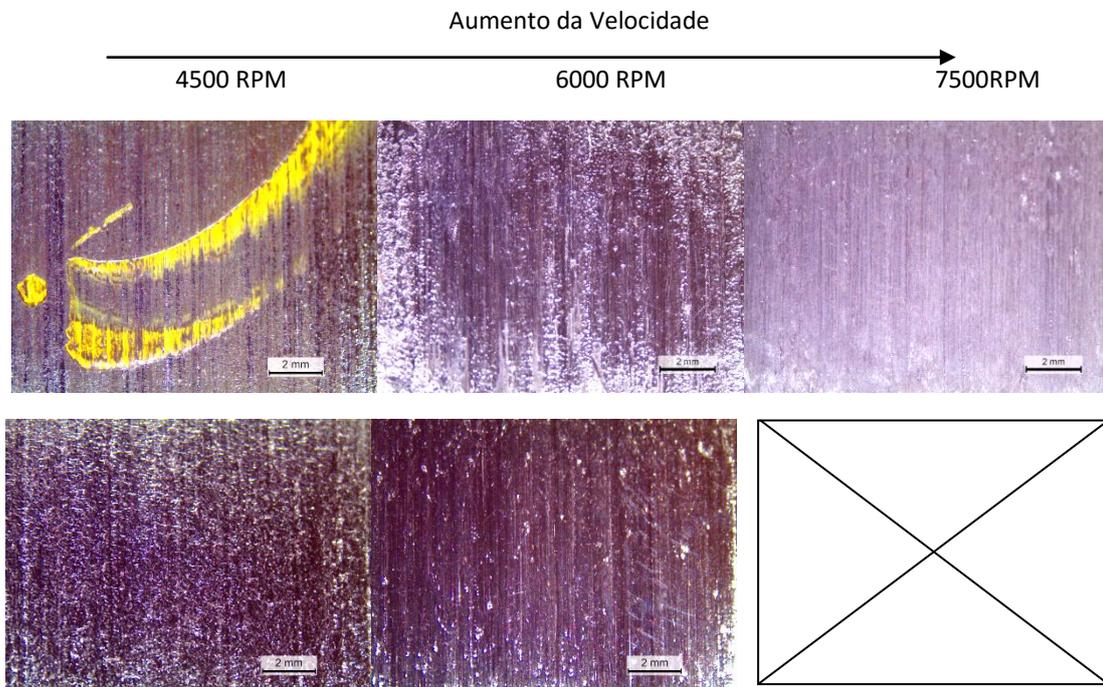


Fig. 4.25: Imagens obtidas por lupa das superfícies escovadas durante 30 s das chapas S235 JR (cima) e S355 JR (baixo) a velocidades de 4500, 6000 e 7500 RPM.

Quando utilizado tempos de escovagem de 15 s (*Fig. 4.26*) também é possível obter bons resultados de remoção do filme de óxidos mas apenas para velocidades superiores a 4500 RPM. Velocidades de 6000 RPM mostraram ser mais eficientes na chapa S355 JR, uma vez que toda a

superfície tratada aparente ser livre de calamina enquanto na chapa S235 JR apenas se inicia a sua remoção. No entanto, ambas as chapas apresentam bons resultados quando utilizada uma velocidade de 7500 RPM.

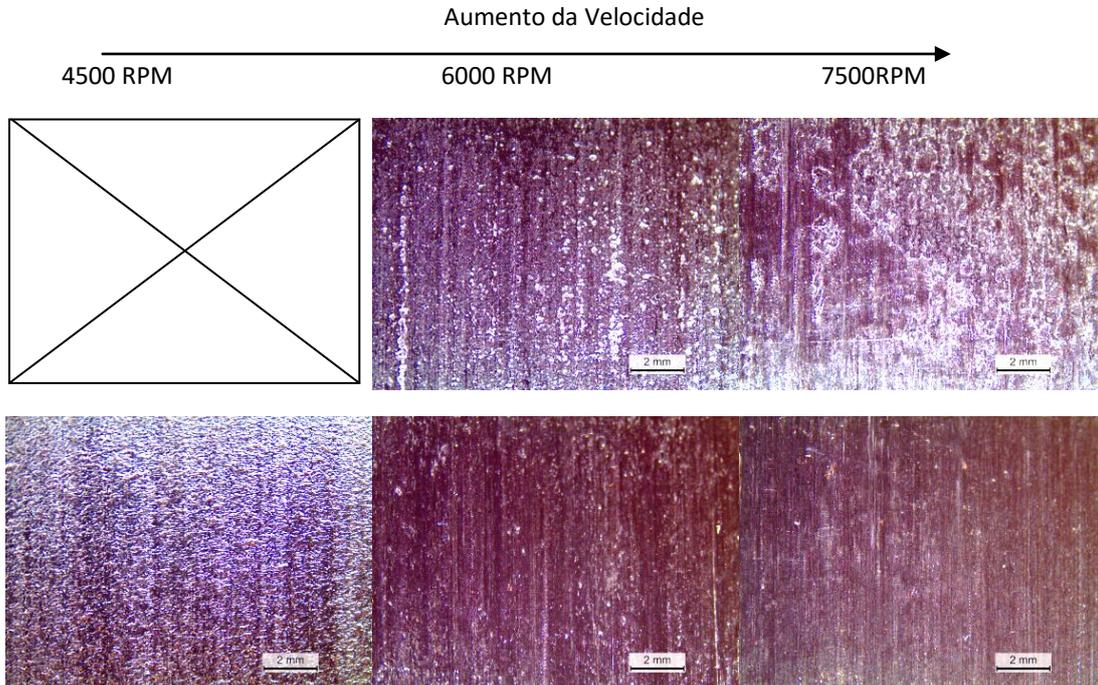


Fig. 4.26: *Imagens obtidas por lupa das superfícies tratadas durante 15 s das chapas S235 JR (cima) e S355 JR (baixo) a velocidades de 4500, 6000 e 7500 RPM.*

Os resultados de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) vêm confirmar a importância da velocidade de escovagem durante a decapagem mecânica. (Fig. 4.27 e 4.28). Verifica-se que para ambas as qualidades de chapa, a velocidade de 4500 RPM não é capaz de remover o filme de óxidos para tempos até 30 s. O aumento da velocidade de escovagem para 6000 RPM permite obter superfícies praticamente livres de O para tempos mais reduzidos, nomeadamente 30 s e 15 s para a chapa S235 JR e S355 JR, respectivamente. Refira-se também, como resultado importante, o facto de não existir evidência de incrustação de material abrasivo na superfície da chapa tratada, ao contrário do que acontece nos processos de decapagem com partículas erosivas.

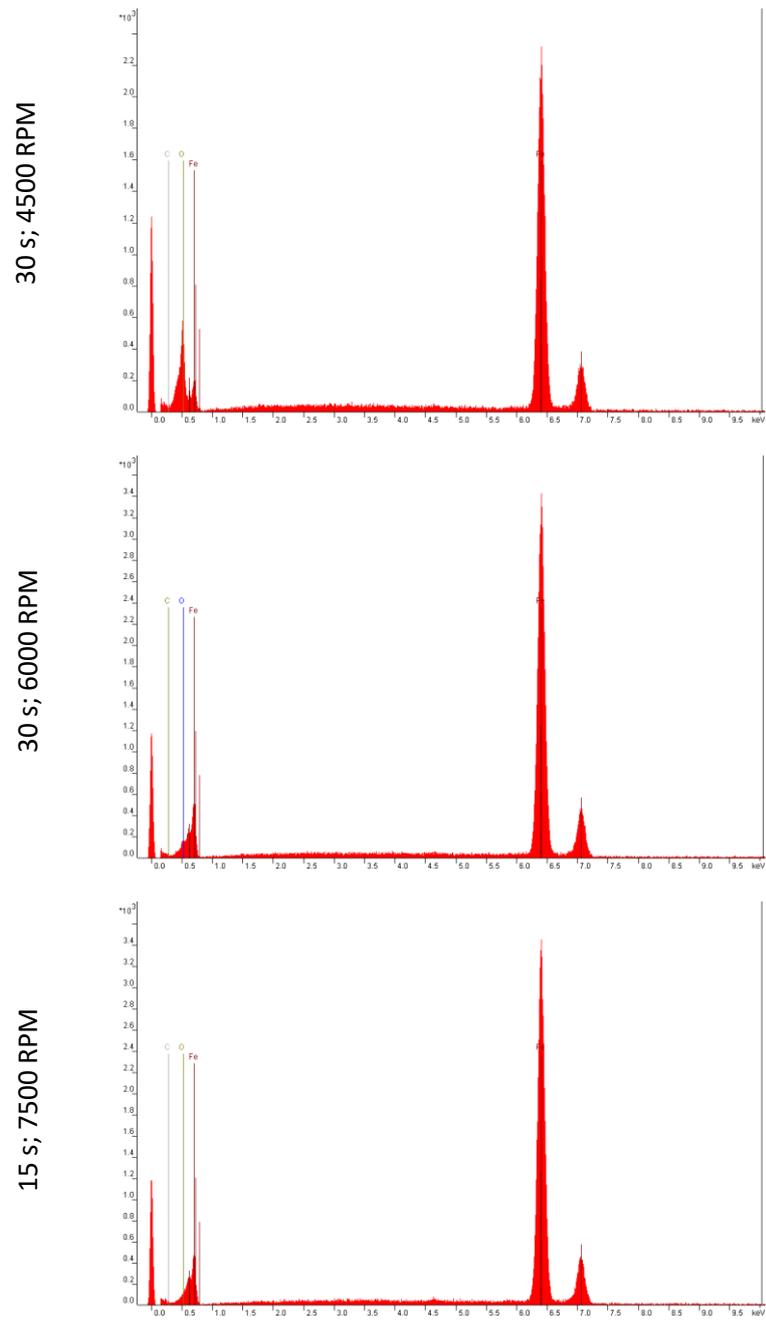


Fig. 4.27: Espectros EDS da chapa S235 JR após uma escovagem durante 30 s a uma velocidade de 4500 e 6000 RPM e 15 s a uma velocidade de 7500 RPM.

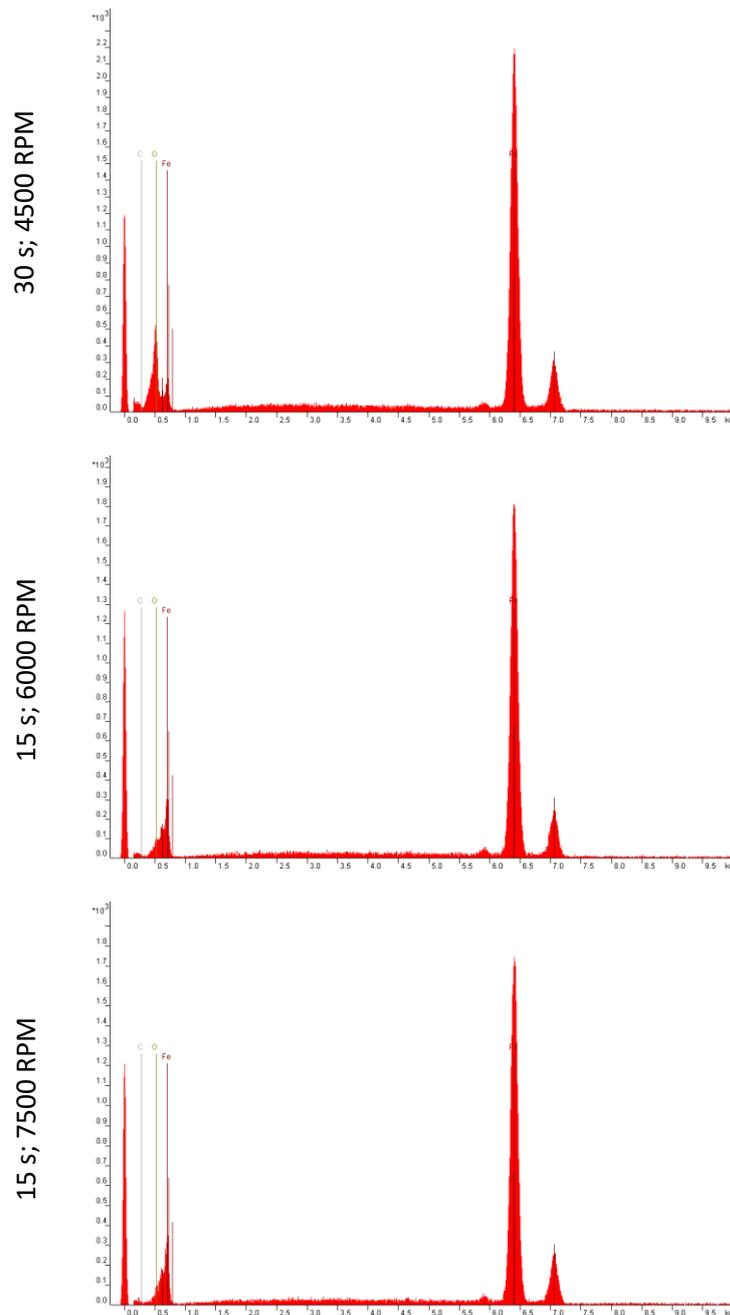
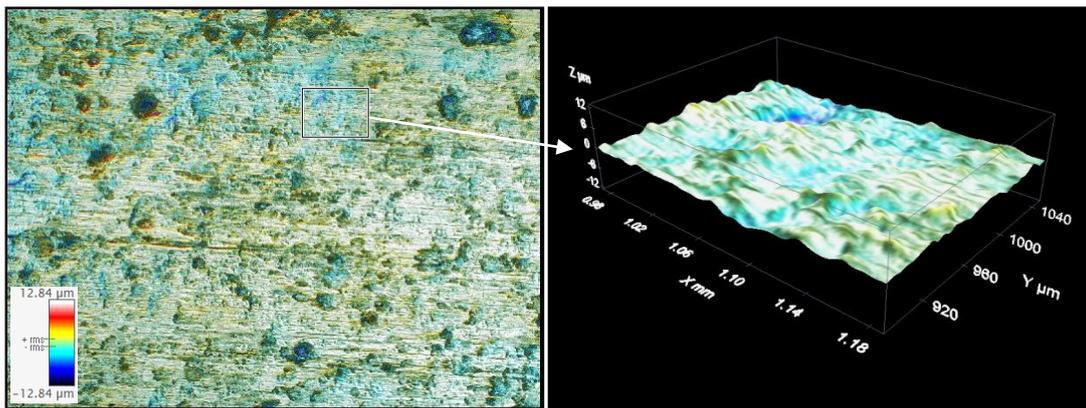


Fig. 4.28: Espectros EDS da chapa S355 JR após uma escovagem durante 30 s a uma velocidade de 4500 RPM e 15 s a uma velocidade de 6000 e 7500 RPM.

A análise topográfica das superfícies escovadas com lamela de manta abrasiva Al_2O_3 (Figs. 4.29, 4.30 e 4.31) corrobora ser possível remover grande parte da calamina sem danificar muito a qualidade do substrato, ao contrário do observado nas anteriores técnicas. Os valores dos parâmetros de rugosidade superficial (Tabela 4.5) mostram que, independentemente das condições de trabalho utilizadas, o valor de S_a está abaixo do valor relativo à superfície metálica antes da técnica de remoção mecânica (Tabela 4.1.). A superfície da chapa S235 JR presente

maiores saliências do que a da chapa S355 JR, e conseqüentemente maior rugosidade, o que se deve ao facto da primeira apresentar uma maior espessura de calamina. Logo, nas mesmas condições de trabalho espera-se que a remoção na chapa S235 JR seja mais demorada, sendo necessário aumentar o tempo de exposição ou velocidade de escovagem. No entanto, parâmetros de rugosidade mostram que velocidades mais altas contribuem para o aumento de S_a , uma vez que a remoção do material é feita de forma mais agressiva. Note-se ainda que as topografias resultantes dos processos de escovagem mostram a direção de ação de remoção da calamina (Fig. 4.29, 4.30, 4.31).

S235 JR



S355 JR

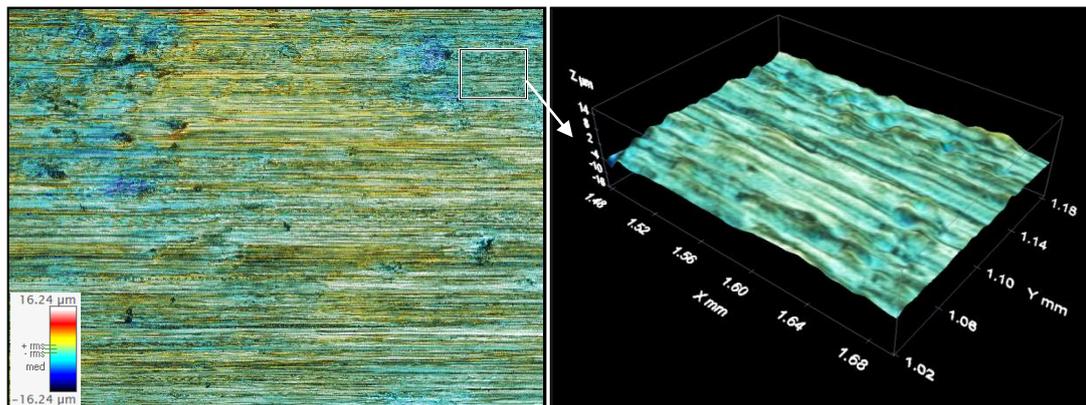
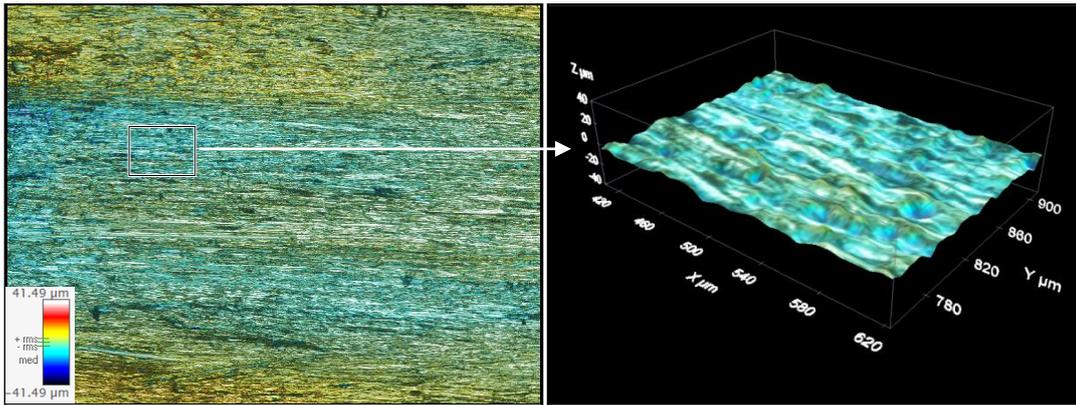


Fig. 4.29: *Imagens obtidas por perfilometria 3D das superfícies tratadas durante 15 s da chapa S235 JR e S355 JR a velocidades de 6000 RPM.*

S235 JR



S355 JR

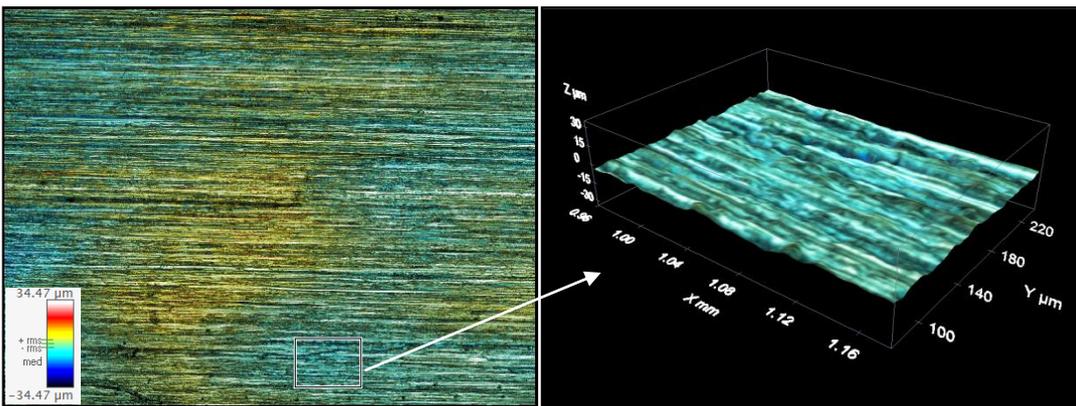


Fig. 4.30: *Imagens obtidas por perfilometria 3D das superfícies tratadas durante 15 s da chapa S235 JR e S355 JR a velocidades de 7500 RPM.*

Tabela 4.5: *Parâmetros de rugosidade superficial das chapas S235 JR e S355 JR correspondentes às Figs. 4.29 e 4.30.*

Parâmetros (μm)	Velocidade de escovagem (RPM)			
	6000		7500	
	S235 JR	S355 JR	S235 JR	S355 JR
S_a	0,96	0,59	1,94	1,17
S_q	1,23	0,77	2,48	1,60
S_p	4,11	3,66	11,90	6,35
S_v	5,91	7,15	12,18	12,43

O fator tempo também é um parâmetro que deve ser devidamente controlado. Através da Tabela 4.6 observa-se que numa velocidade de 7500 RPM a um maior tempo de exposição da chapa à ação mecânica da lamela abrasiva (30 s) resulta num aumento pouco significativo do

valor de S_a quando comparado com uma exposição de 5 s de duração. Desta forma, constata-se que o filme de óxidos na superfície das chapas metálicas é rapidamente removido.

Com a aplicação das lamelas de manta abrasiva a velocidade elevada (igual ou superior a 6000 RPM) comprova-se que é possível remover calamina aderente, pelo que esta técnica poderá funcionar não só para oxidação de grau C, como referido no capítulo 2, mas também para calamina de grau A.

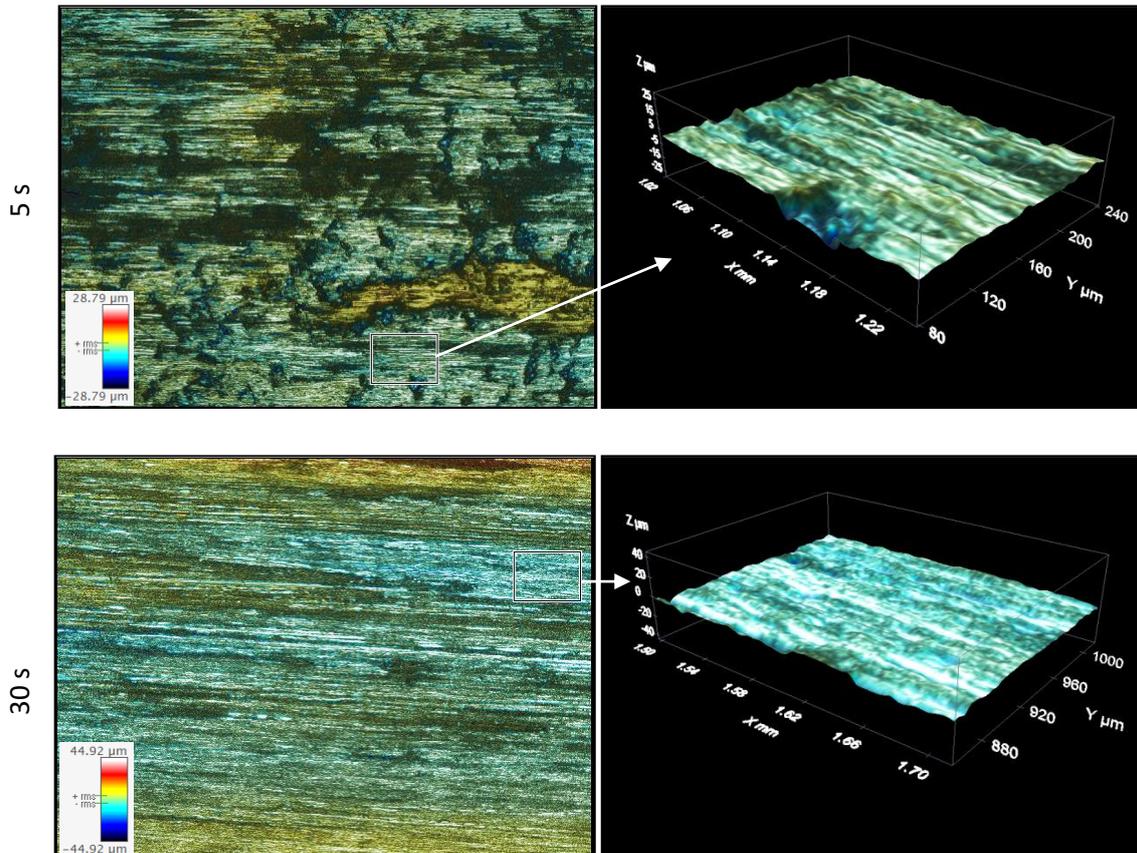


Fig. 4.31: *Imagens obtidas por perfilometria ótica 3D das superfícies tratadas durante 5 e 30 s da chapa S235 JR a uma velocidade de 7500 RPM.*

Tabela 4.6: Parâmetros de rugosidade superficial da chapa S235 JR correspondentes à Fig. 4.31.

Parâmetros (μm)	Tempo de Escovagem (s)	
	5	30
S_a	1,25	1,35
S_q	1,81	1,83
S_p	7,39	6,10
S_v	25,43	15,91

4.5.2. Escova Abrasiva de Alumina 125 μm

A escova abrasiva com partículas de 125 μm de Al_2O_3 mostra-se também adequada para a remoção da calamina (Figs. 4.32 e 4.33). Devido ao efeito agressivo das cerdas da escova, o uso de 4500 RPM de velocidade angular para tempos de escovagem de 30 s já torna possível a remoção da calamina na chapa 235 JR, o que não acontecia na lamela de manta abrasiva nas mesmas condições. No entanto, quando utilizada uma velocidade de 6000 RPM a remoção da calamina já se dá na chapa S355 JR.

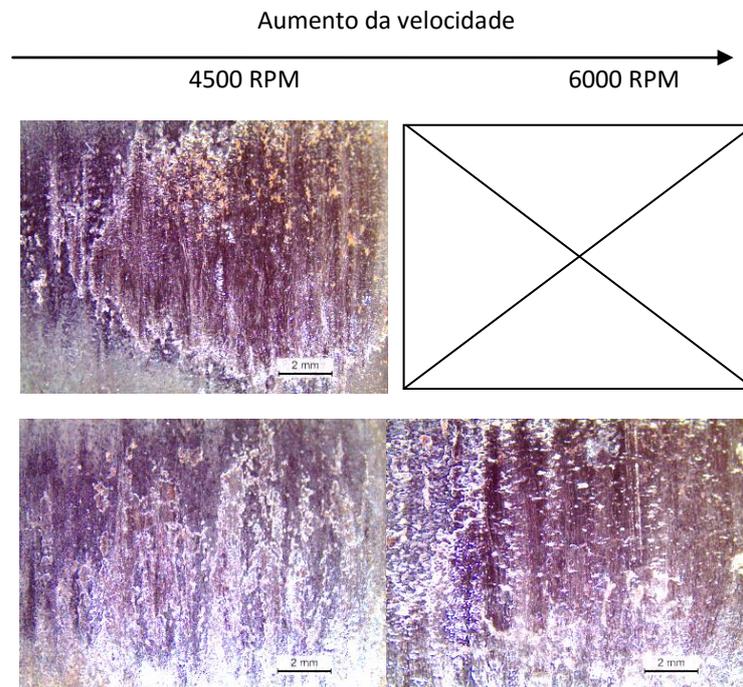


Fig. 4.32: Imagens obtidas por lupa das superfícies tratadas durante 30 s das chapas S235 JR (cima) e S355 JR (baixo) a velocidades de 4500 e 6000 RPM.

Para tempos de 15 s (Fig. 4.33) a situação ótima para ambas as qualidades de chapa é o tratamento à velocidade de 6000 RPM. Neste caso há um excelente grau de remoção da camada de óxidos sem danificar a superfície da chapa. Abaixo desta velocidade, a remoção deste filme mostra-se apenas possível na chapa S235 JR, mais uma vez. Ainda na Fig. 4.33 observa-se que quando é utilizada uma velocidade de 7500 RPM, a superfície da chapa S235 JR sofre alterações, o que mostra que o aumento da velocidade de rotação aumenta a agressividade da escova. Face a estes resultados, constata-se que é possível obter bons resultados de remoção de calamina para tempos de ciclo mais curtos com velocidades de 7500 RPM.

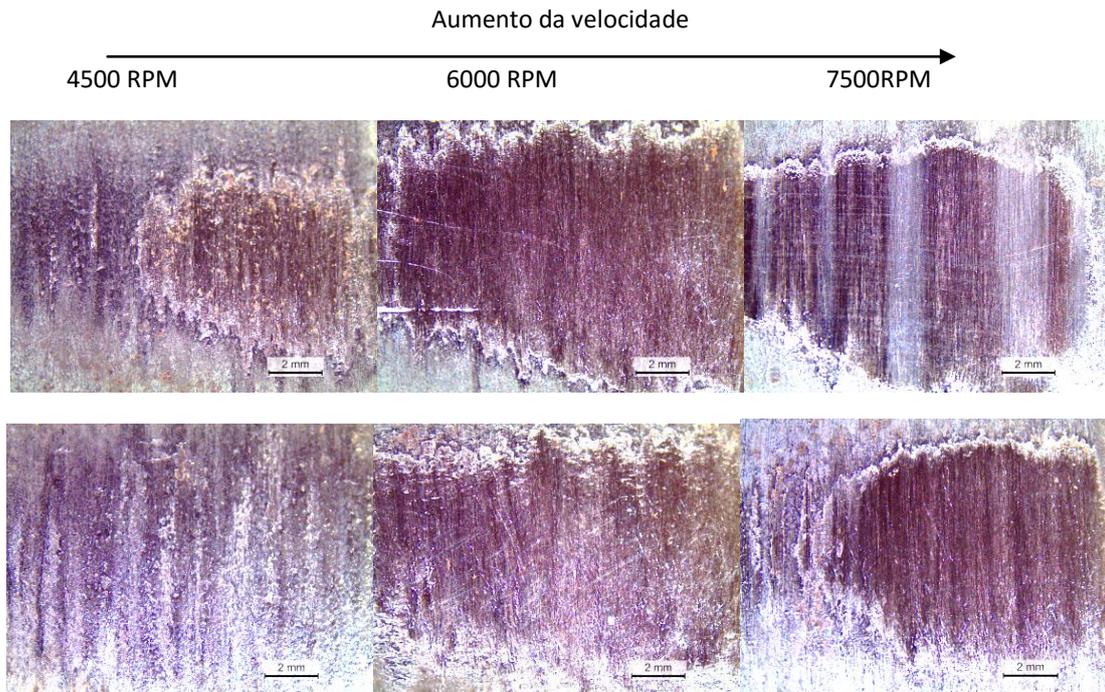


Fig. 4.33: *Imagens obtidas por lupa das superfícies tratadas durante 15 s das chapas S235 JR (cima) e S355 JR (baixo) a velocidades de 4500, 6000 e 7500 RPM.*

Bons resultados também são possíveis de se obter para tempos de 5 s com velocidades de 7500 RPM (*Fig. 4.34*). Nestas condições a superfície metálica é muito idêntica quando utilizado um tempo de escovagem de 15 s a uma velocidade de 6000 RPM. No entanto, para velocidades mais reduzidas o grau de remoção do filme de óxidos é muito baixo. As zonas mais claras na chapa S235 JR correspondem a áreas onde já foi possível atingir o substrato, possivelmente por se tratar de zonas onde a calamina é menos espessa ou menos aderente.

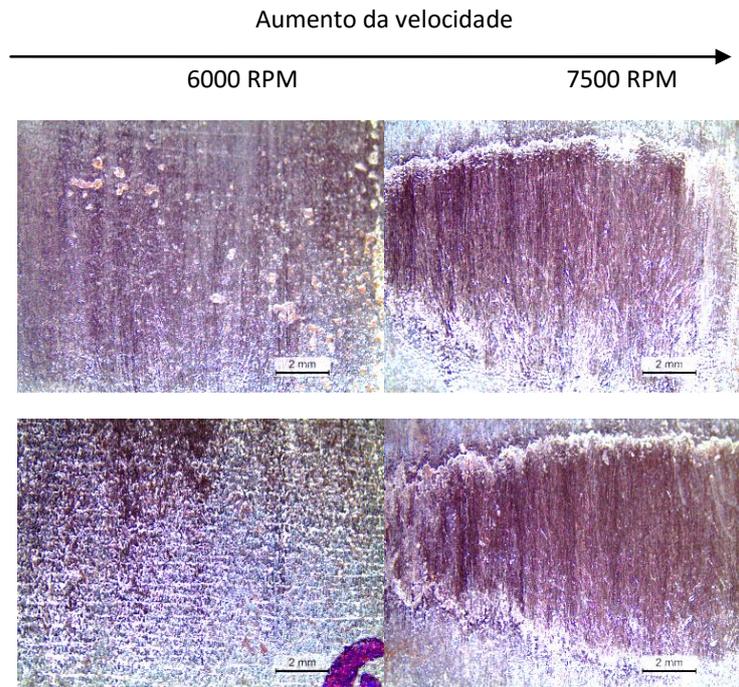


Fig. 4.34: *Imagens obtidas por lupa das superfícies tratadas durante 5 s das chapas S235 JR (cima) e S355 JR (baixo) a velocidades de 6000 e 7500 RPM.*

Os resultados das análises EDS (Figs. 4.35 e 4.36) comprovam que a escova 125 μm Al_2O_3 é capaz de conferir um maior grau de remoção da calamina do que a lamela de manta abrasiva de Al_2O_3 , para condições de trabalho com menores tempos e velocidades de escovagem. Na Fig. 4.35 verifica-se que para a chapa S235 JR, quando utilizada uma velocidade de escovagem de 4500 RPM durante 15 s, a superfície metálica encontra-se praticamente livre de oxigênio, ao contrário do que acontecia com a mesma velocidade usando as lamelas de manta abrasiva (Fig. 4.28). No entanto, para a chapa S355 JR velocidades de 4500 RPM até tempos de escovagem de 30 s (Fig. 4.36) continuam a ser condições de trabalho insuficientes para o efeito desejado, não havendo praticamente remoção do filme de óxidos. O aumento da velocidade de trabalho da escova veio a contornar esta situação.

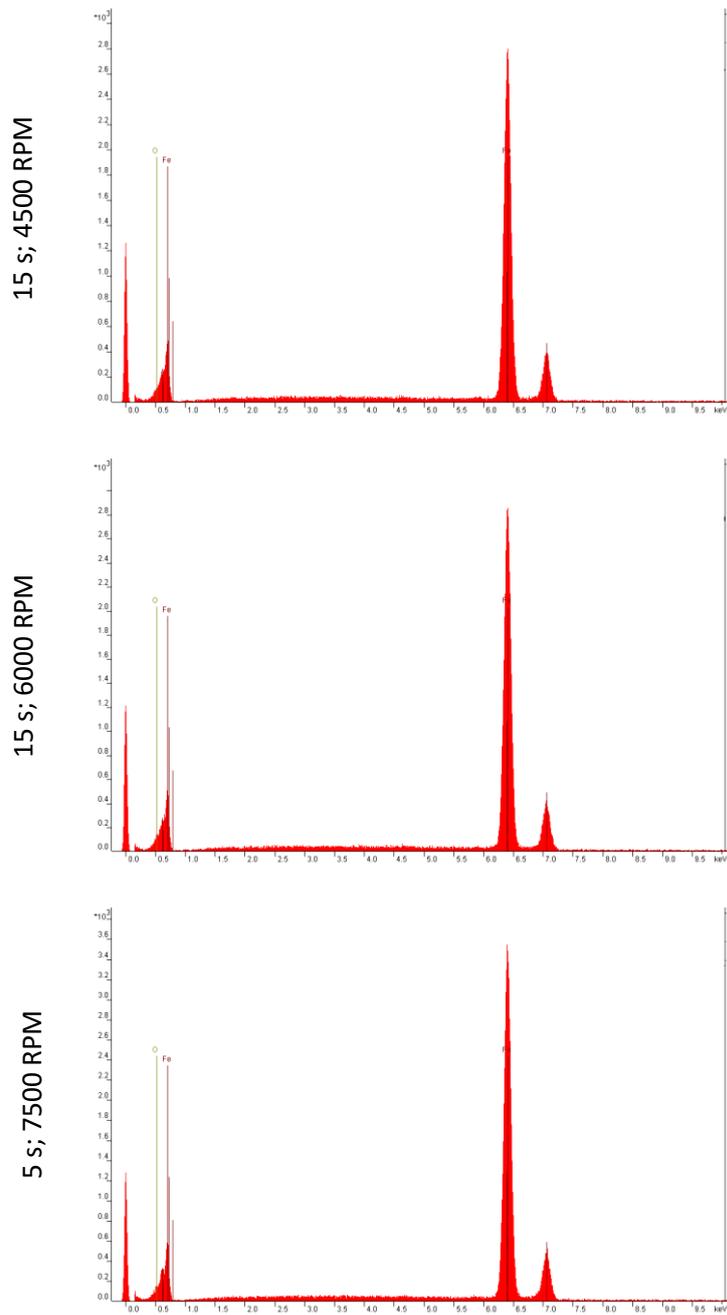


Fig. 4.35: Análise de espectro EDS da chapa S235 JR após uma escovagem durante 15 s a uma velocidade de 4500 e 6000 RPM e 5 s a uma velocidade de e 7500 RPM.

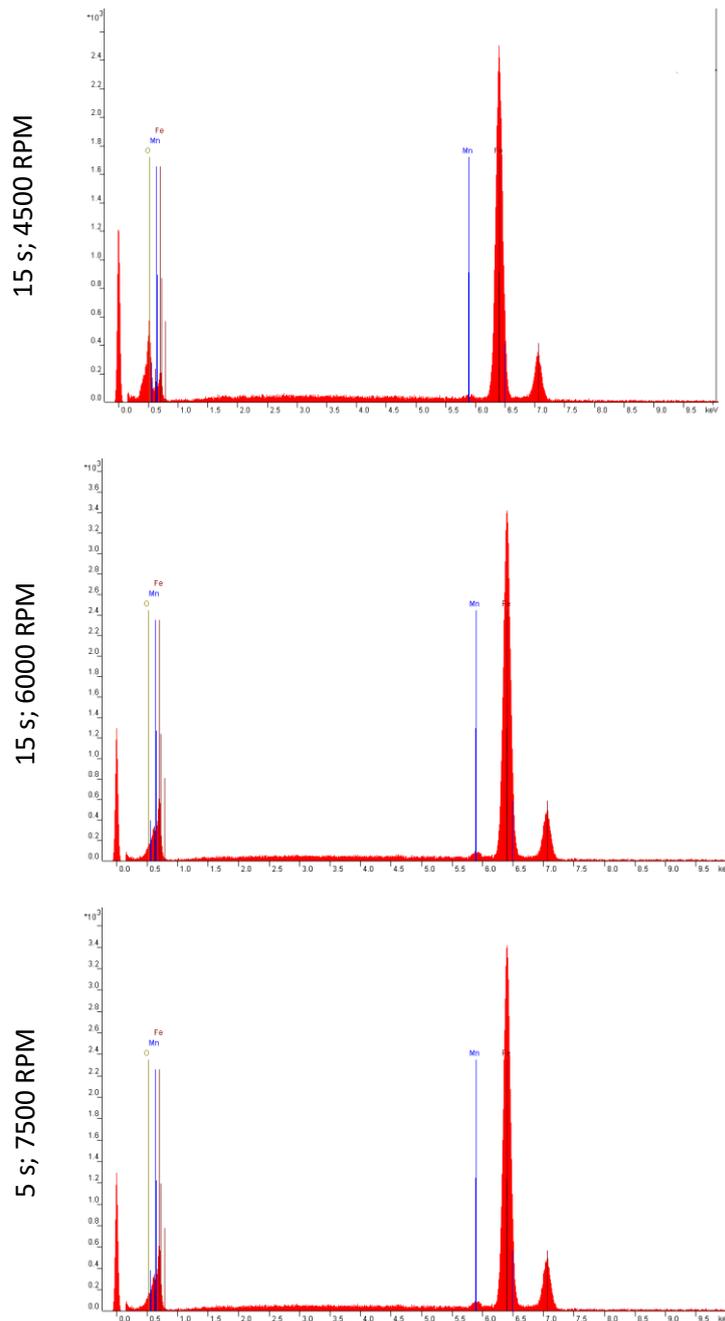


Fig. 4.36: Análise de espectro EDS da chapa S355 JR após uma escovagem durante 15 s a uma velocidade de 4500 e 6000 RPM e 5 s a uma velocidade de e 7500 RPM.

Os resultados de rugosidade superficial de ambas as chapas (Figs. 4.37 e 4.38 e Tabela 4.7.) demonstram que uma escova de nylon abrasivo com partículas de 125 μm Al_2O_3 tem uma ação parecida com a das lamelas de manta abrasiva nas mesmas condições de trabalho (Figs. 4.29 e 4.30 e Tabela 4.5.). Tal como nesse caso os valores dos parâmetros de rugosidade encontram-se abaixo dos determinados antes da prática da decapagem mecânica (Tabela 4.1.).

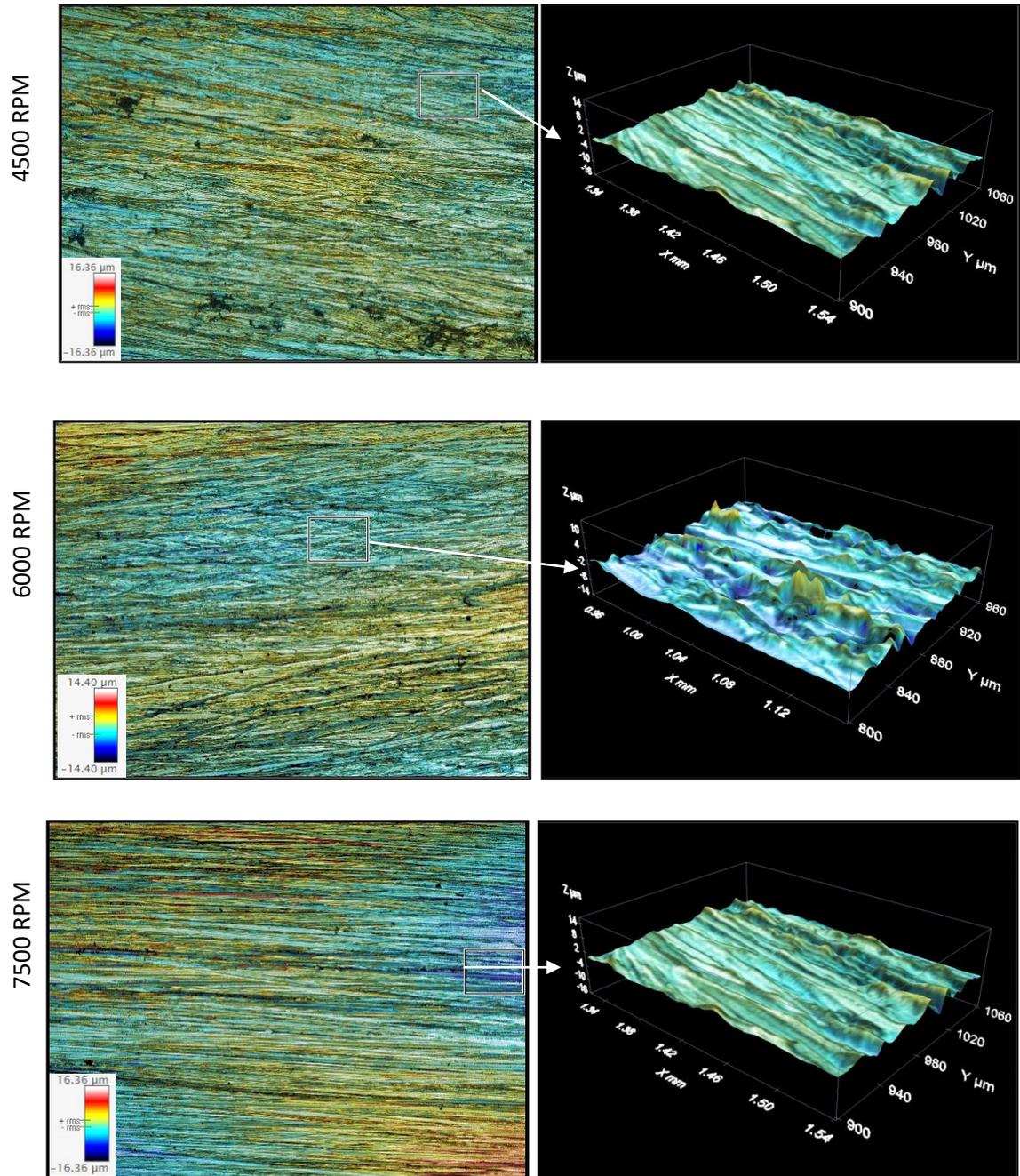


Fig. 4.37: *Imagens obtidas por perfilometria ótica 3D das superfícies tratadas durante 15 s da chapa S235 JR a velocidades de 4500, 6000 e 7500 RPM.*

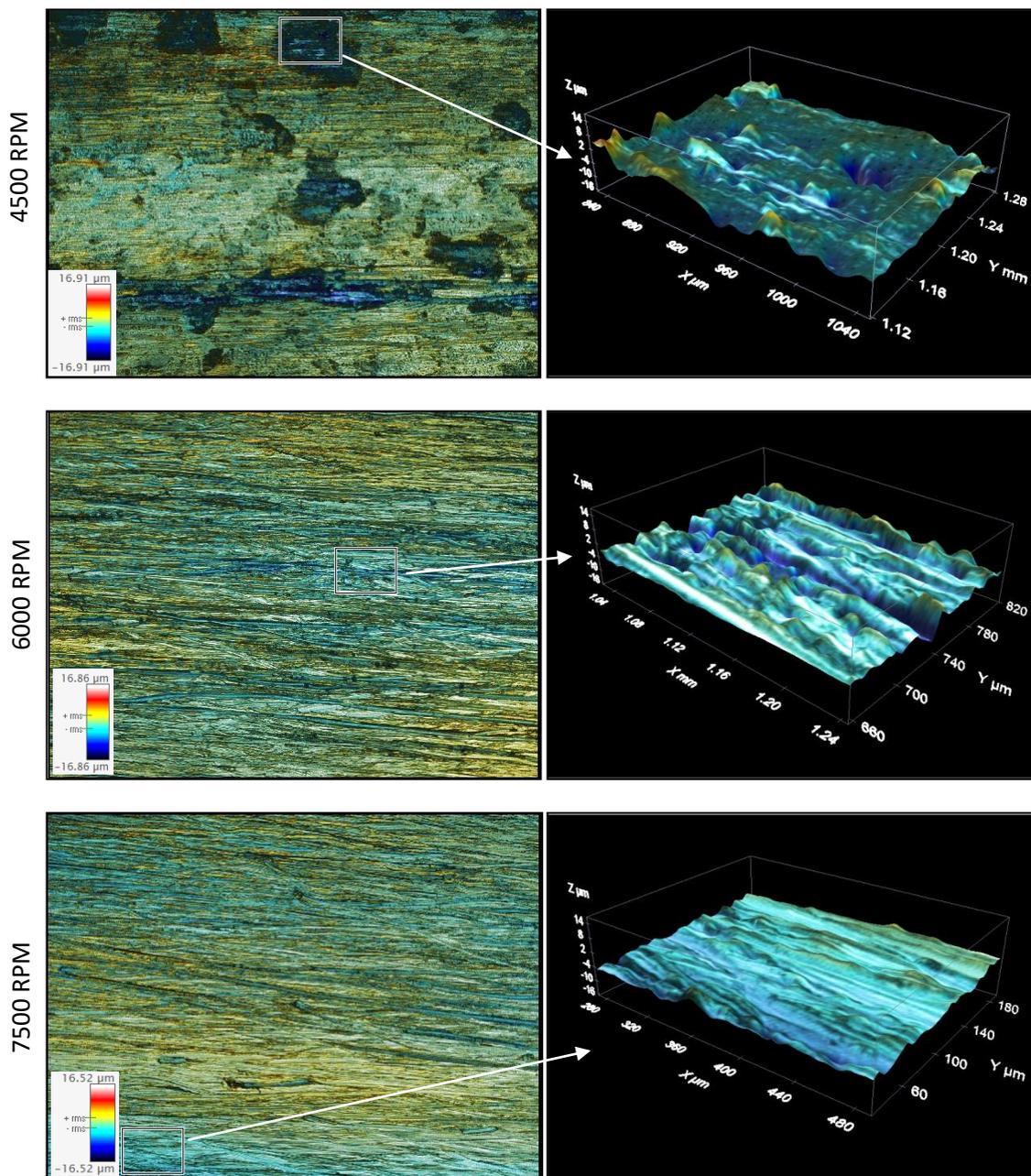


Fig. 4.38: Imagens obtidas por perfilometria ótica 3D das superfícies tratadas durante 15 s da chapa S355 JR a velocidades de 4500, 6000 e 7500 RPM.

Tabela 4.7: Parâmetros de rugosidade superficial das chapas S235 JR e S355 JR correspondentes às superfícies das Figs. 4.37e 4.38.

Parâmetros (μm)	Velocidade de escovagem (RPM)					
	4500		6000		7500	
	S235 JR	S355 JR	S235 JR	S355 JR	S235 JR	S355 JR
S_a	0,86	1,81	1,43	1,76	1,32	1,07
S_q	1,15	2,43	2,07	2,39	1,86	1,37
S_p	4,39	11,62	21,36	8,00	6,42	5,67
S_v	7,32	16,28	12,56	15,21	12,23	7,09

4.5.3. Escova Abrasiva de Alumina 80 μm

Quando se utiliza uma escova abrasiva de alumina com menor tamanho de partículas (80 μm) a ação de remoção da calamina é menos eficaz (Fig. 4.39 e 4.40). No caso anterior (escova de 125 μm Al_2O_3) verificou-se que o uso de velocidades de 4500 RPM para tempos de 30 e 15 s na chapa S235 JR permite alcançar o propósito deste trabalho, o que não acontece quando utilizado um *grit* mais reduzido do mesmo material abrasivo da escova. A redução da granulometria do abrasivo e as cerdas mais finas desta escova proporcionam uma menor agressão durante a limpeza da superfície, uma vez que é mais flexível e o contacto com a superfície metálica é menos efetivo. No entanto, apesar de se tratar de uma escova menos agressiva, existem condições de trabalho capazes de remover grande parte do filme de óxidos. Quando utilizada uma velocidade de 6000 RPM é visível a remoção parcial da calamina em ambas as chapas, sem danificar a superfície metálica.

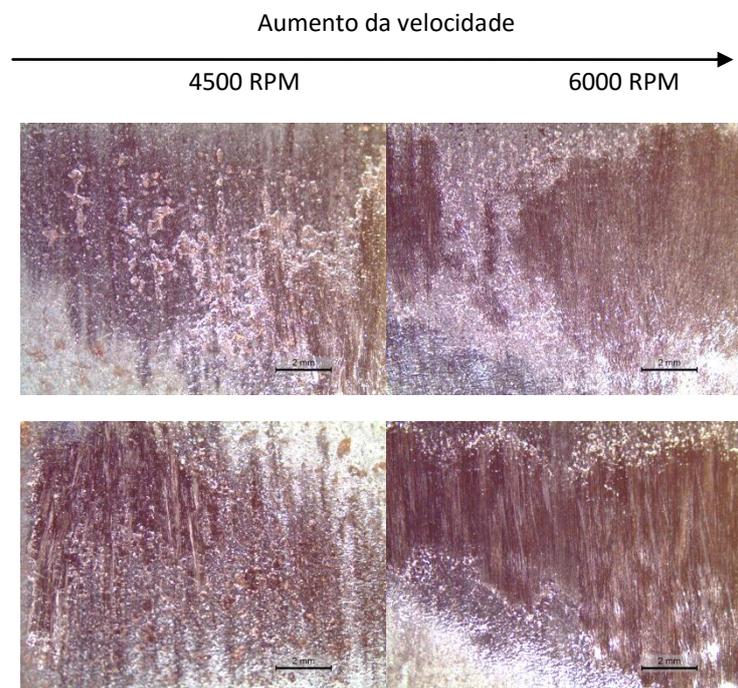


Fig. 4.39: Imagens obtidas por lupa das superfícies tratadas durante 30 s das chapas S235 JR (cima) e S355 JR (baixo) a velocidades de 4500 e 6000 RPM.

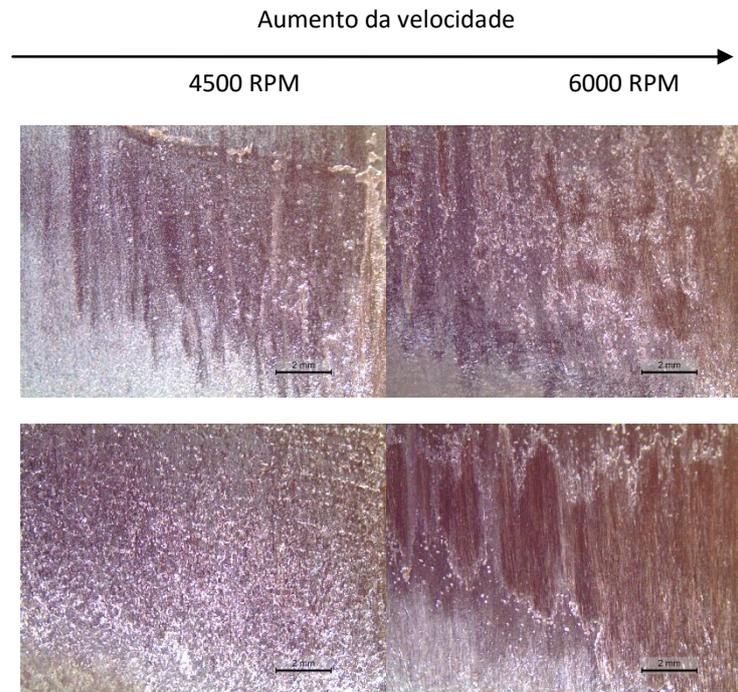


Fig. 4.40 *Imagens obtidas por lupa das superfícies tratadas durante 15 s das chapas S235 JR (cima) e S355 JR (baixo) a velocidades de 4500 e 6000 RPM.*

Os resultados de EDS vêm demonstrar que foi alcançado um bom grau de remoção da calamina nas zonas onde a superfície metálica aparenta estar isenta de óxidos, dada ausência do pico de oxigênio em todos os espectros (*Fig. 4.41*).

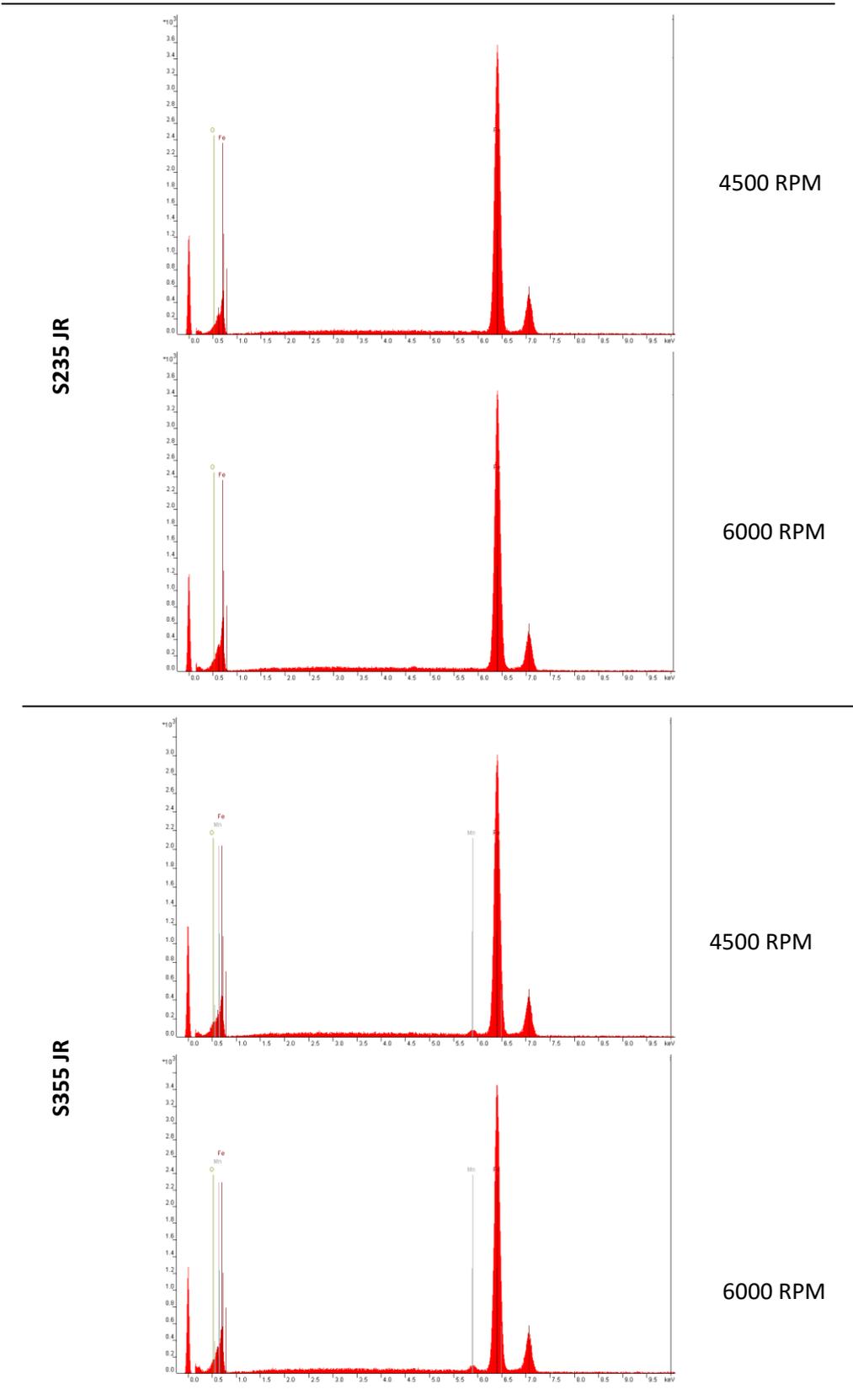


Fig. 4.41: Análise de espectro EDS das chapas S235 JR e S355 JR após uma escovagem durante 30 s a uma velocidade de 4500 RPM e 15s a 6000 RPM.

Da análise topográfica das superfícies tratadas a uma velocidade de 6000 RPM (Fig. 4.42 e 4.43) e dos respectivos valores de rugosidade (Tabela 4.8.) constata-se que uma escova de nylon de 80 μm Al_2O_3 sacrifica menos a superfície metálica do que uma escova de 125 μm Al_2O_3 nas mesmas condições de trabalho (ver valores a 6000 RPM na Tabela 4.7.), apesar de o grau de remoção ser mais reduzido. A redução da granulometria das partículas abrasivas resulta numa superfície mais polida. Para ambas as chapas é visto que numa velocidade de 6000 RPM usar tempos de 30 s de escovagem pode ser adequado para a obtenção de melhores valores dos parâmetros de rugosidade, nomeadamente para um melhor acabamento superficial.

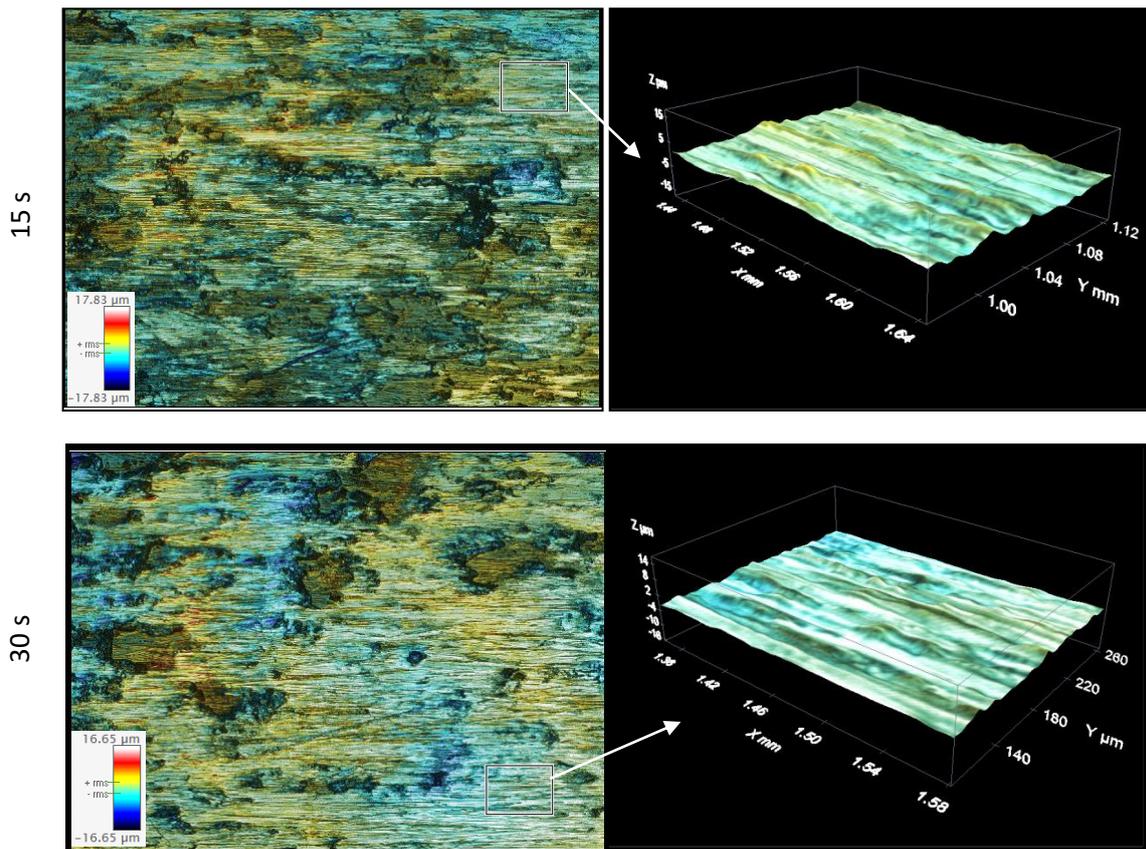


Fig. 4.42: Imagens obtidas por perfilometria ótica 3D das superfícies tratadas da chapa S235 JR durante 15 e 30 s a uma velocidade de 6000 RPM.

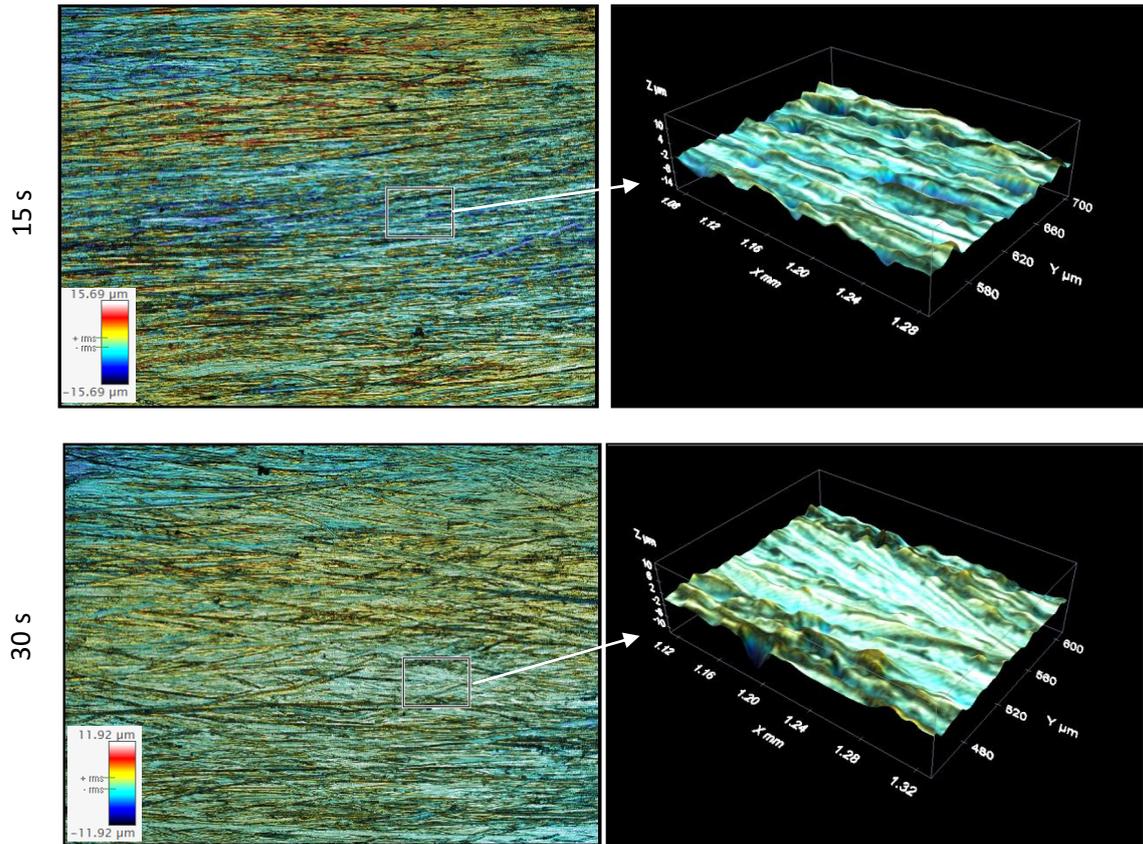


Fig. 4.43: Imagens obtidas por perfilometria ótica 3D das superfícies tratadas da chapa S355 JR durante 15 e 30 s a uma velocidade de 6000 RPM.

Tabela 4.8: Parâmetros de rugosidade superficial das chapas S235 JR e S355 JR correspondentes aos perfis da Fig. 4.42 e 4.43.

Parâmetros (μm)	Tempo de Escovagem (s)			
	15		30	
	S235 JR	S355 JR	S235 JR	S355 JR
S_a	0,91	1,19	0,85	0,81
S_q	1,15	1,69	1,06	1,04
S_p	4,79	5,07	3,96	4,71
S_v	3,12	10,05	3,32	8,88

4.6. Caracterização das Chapas Após Ablação a Laser

As melhores condições para a remoção da calamina de ambas as qualidades de chapa com o laser Nd:YAG (1064 nm) ocorrem para cinco passagens, com uma corrente de 25 A, frequência de 20 KHz e velocidade da chapa de 5 mm/s, como se pode observar nas imagens da *Fig. 4.44*. Nestas condições observa-se uma completa ablação da calamina sem provocar danos significativos na superfície metálica, embora no final as superfícies de ambas as qualidades de aço apresentem linhas horizontais associadas à trajetória percorrida pelo feixe do laser. Ainda comparando a qualidade do tratamento a laser entre as duas qualidades de chapa, na *Fig. 4.44*, observa-se que a chapa S355 JR tem uma superfície metálica aparentemente mais limpa do que a chapa S235 JR, o que se pode dever à menor espessura da calamina da primeira.

Corrente = 25 A

Frequência = 20kHz

Velocidade da chapa = 5 mm/s

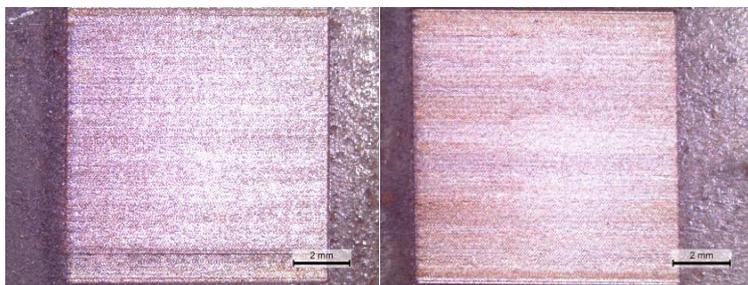


Fig. 4.44: Imagens obtidas por lupa das superfícies tratadas a laser das chapas S235 JR (esquerda) e S355 JR (direita), com 5 passagens e uma velocidade de feixe de 1000 mm/s.

Mantendo o mesmo tempo de incidência do laser, ou seja executando apenas uma passagem com uma velocidade da chapa 5 vezes menor (1 mm/s), o resultado é aparentemente idêntico (*Fig. 4.45*, imagem da esquerda).

Quando se mantém a velocidade de 5 mm/s, mas apenas com uma passagem, o grau de remoção da calamina é insuficiente, mesmo com o aumento da energia do feixe (*Fig. 4.45*, imagem à direita). Nestas condições de trabalho é visível que o filme de óxidos permanece sobre o substrato, ocorrendo apenas a remoção da calamina mais externa. Para além do grau de remoção ser bastante insuficiente, ainda é visível que o aumento da energia com que o feixe atua no ponto focal também contribui para a formação de danos superficiais (zonas acastanhadas).

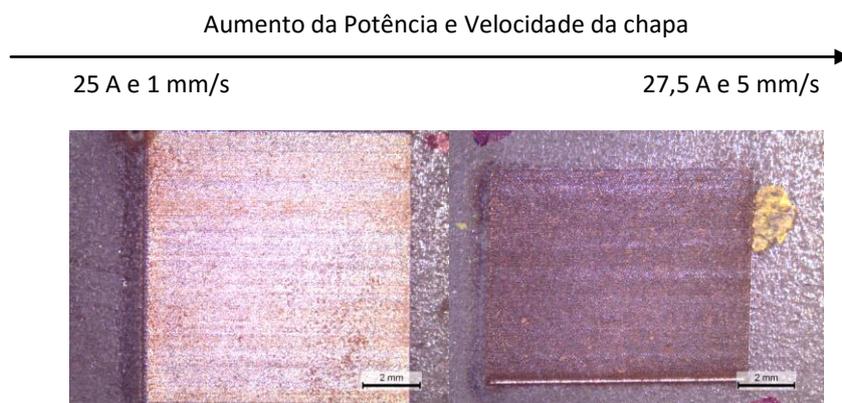


Fig. 4.45: *Imagens obtidas por lupa das superfícies tratadas a laser da chapa S235 JR com 1 passagem, a uma frequência de 20 KHz e velocidade de feixe de 1000 mm/s.*

Uma vez que a chapa S355 JR apresenta um filme de óxidos menos espesso do que a chapa S235 JR procurou-se realizar 1 passagem nas mesmas condições do ensaio registado na Fig. 4.44. Como se pode observar na Fig. 4.46 (imagem da esquerda) O filme de óxidos permanece praticamente intacto sobre a superfície metálica, havendo apenas algumas zonas em que é visível a sua remoção até ao substrato (zonas claras). Desta forma, decidiu-se diminuir a velocidade da chapa de 5 para 1,67 mm/s, reduzindo-se ao mesmo tempo a redução da potência do pulso laser de 25 para 20 A por forma a evitar oxidação do metal. Estas condições de trabalho também se mostraram insuficientes (Fig. 4.46, imagem à direita), sendo os resultados muito semelhantes aos verificados com 5 mm/s de avanço.

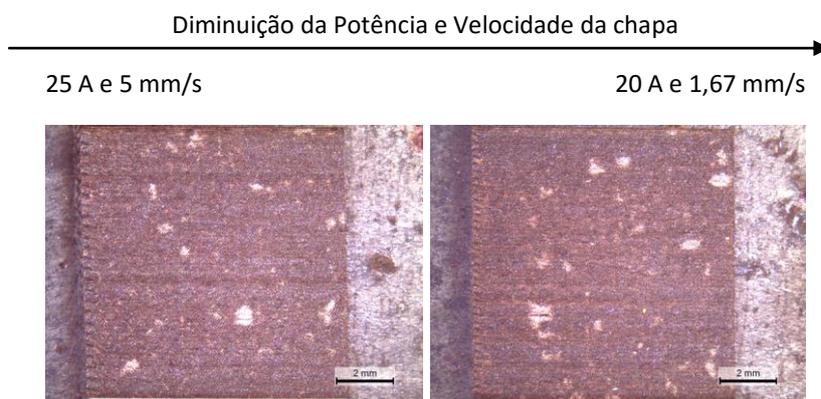


Fig. 4.46: *Imagens obtidas por lupa das superfícies tratadas a laser da chapa S355 JR com 1 passagem, a uma frequência de 20 KHz e velocidade de feixe de 1000 mm/s.*

Da análise EDS das chapas tratadas nas condições da Fig.4 44 consta-se que o laser Nd:YAG (1064nm) permite remover o filme de óxidos (Fig. 4.47), tal como se conseguiu por processos mecânicos.

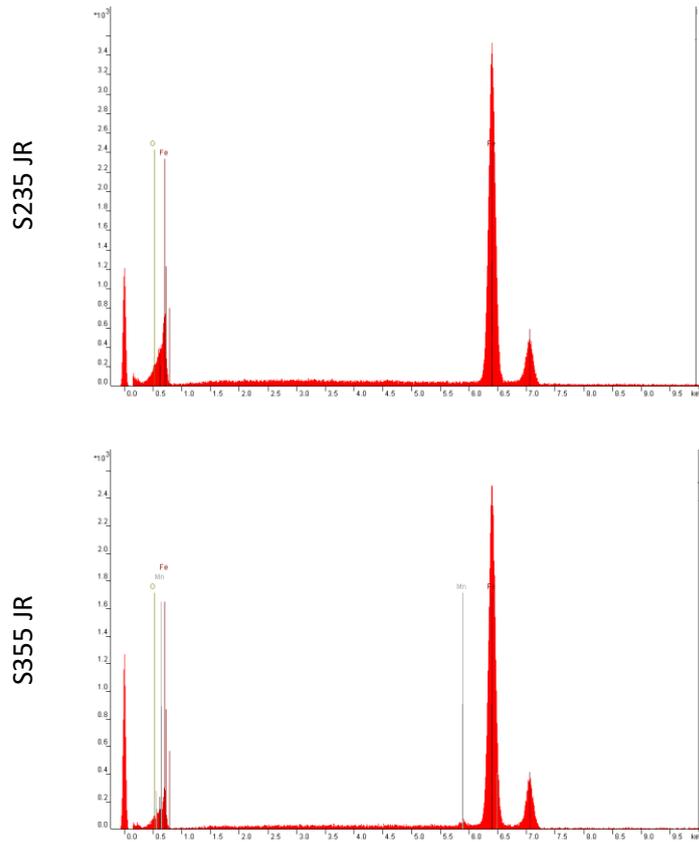
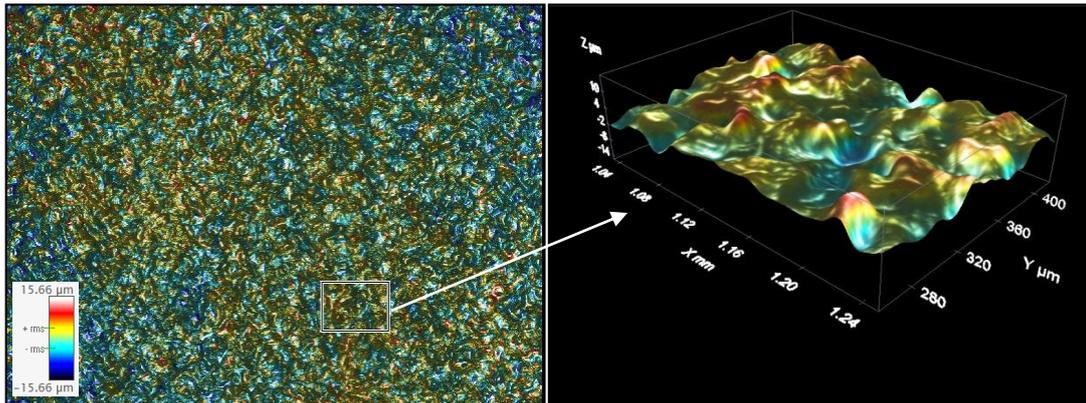


Fig. 4.47: Análise de espectro EDS das chapas S235 JR e S355 JR tratadas a laser nas condições da Fig. 4.44.

Imagens obtidas por perfilometria ótica 3D das superfícies metálicas tratadas a laser (Fig. 4.48 e 4.49) mostram a formação de superfícies com saliências e reentrâncias em ambas as chapas. Observa-se que a chapa S355 JR é aquela que sofre mais danos na sua rugosidade superficial nas mesmas condições de trabalho, por esta apresentar uma calamina menos espessa. Este fenómeno deve-se ao facto de a calamina desse apresentar como um filme irregular e como tal, uma vez removida, o feixe laser começar a interagir com o substrato. No final do processo de decapagem a laser, regista-se que S_a é de 2,02 e 2,83 para a chapa S235 JR e S355 JR, respectivamente (Tabela 4.9). Os valores de S_a e S_q não diferem muitos dos valores determinados antes dos processos de decapagem (Tabela 4.1). Porém, há redução notória de S_p e S_v em ambas as chapas indicando que ocorre uma uniformização das alturas e profundidades dos picos e vales.

Com uma lente objetiva de 50x de ampliação observa-se com maior detalhe o efeito que o feixe laser tem sobre a superfície. Em ambas as chapas, o feixe laser de alta energia provocou o aquecimento da superfície metálica, originando zonas típicas de processos de fusão superficial (cordões de “líquido” nas cristas das saliências e crateras arredondadas nos vales) que sofreram posteriormente uma solidificação rápida.

Lente objetiva 10X



Lente objetiva 50X

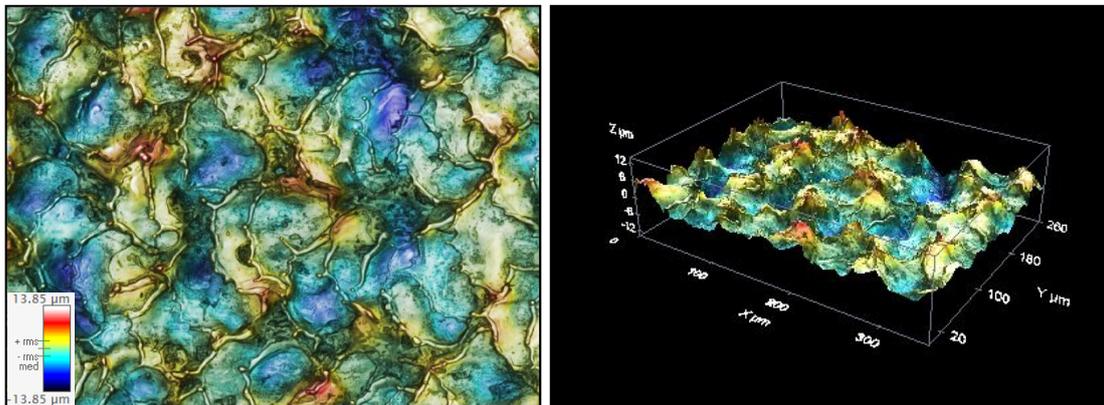
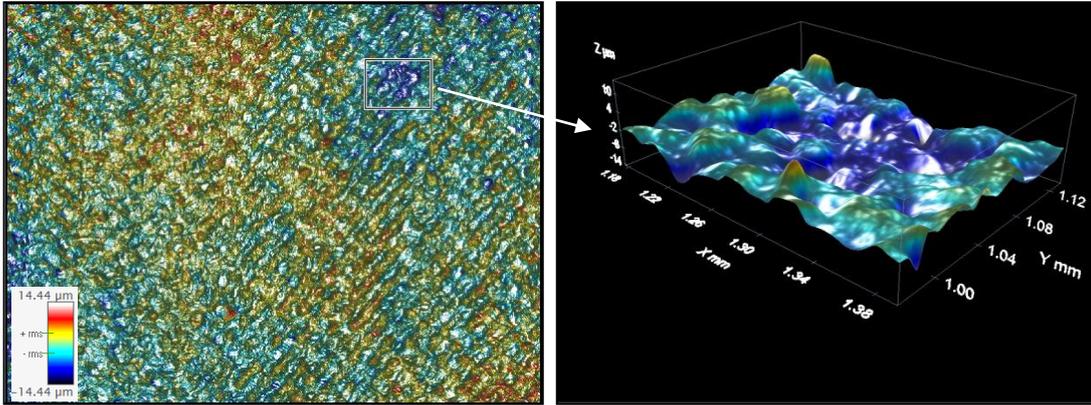


Fig. 4.48: *Imagens obtidas por perfilometria ótica 3D das superfícies tratadas da chapa S235 JR nas condições da Fig. 4.44 (imagem à esquerda).*

Lente objetiva 10X



Lente objetiva 50X

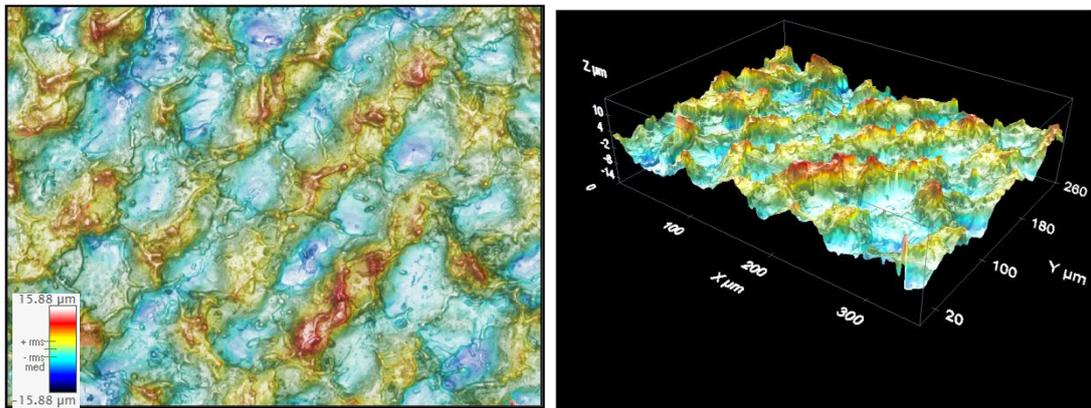


Fig. 4.49: Imagens obtidas por perfilometria ótica 3D das superfícies tratadas da chapa S355 JR nas condições da Fig. 4.44 (imagem à direita).

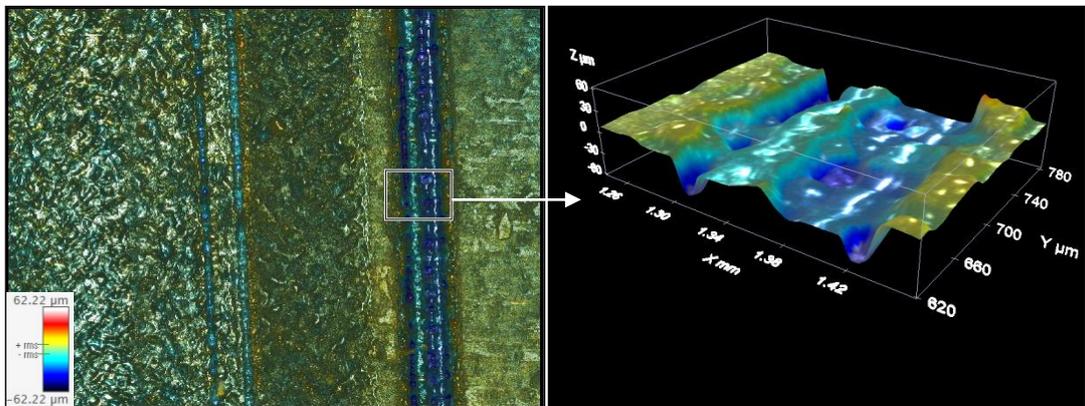
Tabela 4.9: Parâmetros de rugosidade superficial das chapas S235 JR e S355 JR correspondentes às Figs. 4.48 e 4.49.

Parâmetros (μm)	Chapas	
	S235 JR	S355 JR
S_a	2,02	2,00
S_q	2,60	2,55
S_p	7,35	7,11
S_v	11,56	12,33

Da análise topográfica das chapas no início do tratamento a laser (Fig. 4.50) observa-se que o laser, até adequar os seus parâmetros de trabalho, tem a tendência a interagir fortemente com a superfície metálica. Nesta zona termicamente afectada é visto a existência de uma grande quantidade de material redepositado sobre o lado direito em ambas as chapas, associado a

material que sofreu fusão e posteriormente sofreu um arrefecimento rápido. No lado esquerdo não se deteta o mesmo, uma vez que o laser em seguida percorre essa mesma zona. Além do mais, é visto que o efeito é mais acentuado na chapa S355 JR. A razão para isto deve-se a diferença de espessuras da camada de óxidos em ambas as chapas.

S235 JR



S355 JR

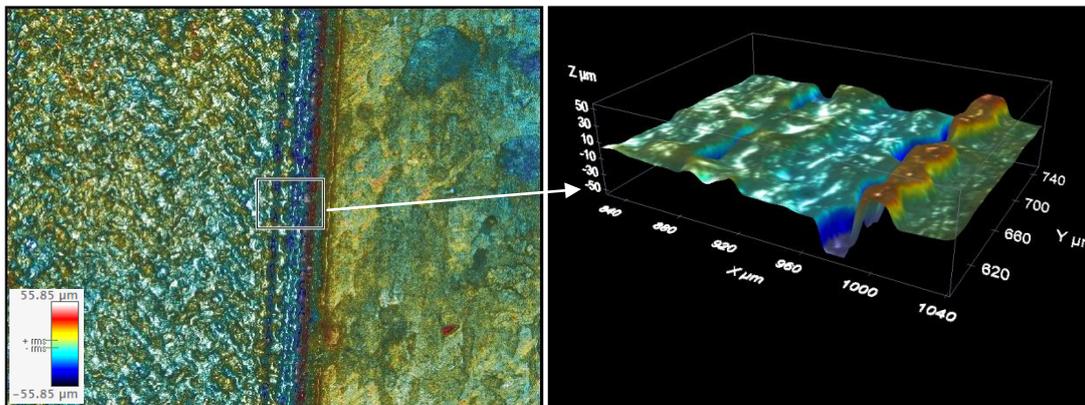


Fig. 4.50: *Imagens obtidas por perfilometria ótica 3D das superfícies no início da decapagem a laser das chapas S235 JR e S355 JR nas condições da Fig. 4.44.*

4.7. Condições de Decapagem da Calamina para cada Técnica

Na Tabela 4.10 identificam-se as condições de cada técnica testada que permitem a remoção da calamina da superfície dos aços S235 JR e S355 JR. Os respectivos valores de rugosidade superficial (S_a), o grau de remoção conseguido e o aspeto superficial macroscópico são resumidos na Tabela 4.11.

Tabela 4.10: Melhores condições de decapagem para as várias técnicas testadas

Técnica de decapagem	Condições experimentais
Jateamento Erosivo por Via Seca- Al ₂ O ₃ e SiC	2,8 bar; 26 mm de distância bico-chapa; 3 g/min; 30 s
Jateamento com Água a Alta Pressão	380 bar; avanço 1 mm/min; 4 mm distância bico-chapa
Jateamento Erosivo por Via Húmida	380 bar; 150 g/min erodente; avanço 15 mm/min; 164 mm distância bico-chapa
Lamela de Manta Abrasiva de Al ₂ O ₃	6000 RPM/ 30 s para 235 JR e 6000 RPM/15 s para S355 JR
Escova Abrasiva de Alumina 125 µm	4500 RPM/15 s para S235 JR e 6000 RPM/15 s para S355 JR
Escova Abrasiva de Alumina 80 µm	6000 RPM; 15 s
Ablação a Laser	20 A; 20 kHz; velocidade do feixe de 1000 mm/s e velocidade da chapa de 5mm/s; 5 passagens

Tabela 4.11: Valores de S_a e grau de remoção/aspeto superficial das chapas S235 JR e S355 JR nas melhores condições de trabalho.

		Valores de S_a (µm)		Grau de Remoção/Aspeto Superficial	
		S235 JR	S355 JR	S235 JR	S355 JR
Superfície original (com calamina)		2,07	2,38		
Jateamento Erosivo por Via Seca	Al ₂ O ₃	4,46	4,70	Remoção praticamente completa, com superfícies de tonalidade branca (cor do agente erosivo Al ₂ O ₃)	
	SiC	4,27	4,74	Remoção praticamente completa, com superfícies de tonalidade cinza (cor do agente erosivo SiC)	
Jateamento com Água a Alta Pressão		16,47		Remoção completa, com erosão excessiva no metal	
Jateamento Erosivo por Via Húmida		19,72		Remoção completa, com erosão excessiva no metal	
Escovagem	Lamela de Manta Abrasiva de Al ₂ O ₃	1,34	0,59	Remoção completa, com superfícies lisas	
	Escova Abrasiva de Alumina 125 µm	0,86	1,76		
	Escova Abrasiva de Alumina 80 µm	0,85	0,81		
Ablação a Laser		2,02	2,00	Remoção completa, com superfícies marcadas com linhas geradas pelo percurso do laser	

Conclusões

Este trabalho teve como objetivo testar técnicas de decapagem para remover a calamina da superfície metálica do aço-carbono sem colocar em causa a qualidade mecânica da chapa e o seu acabamento superficial, fundamentalmente a rugosidade. Como principais conclusões destacam-se:

- (i) Todas as técnicas testadas no trabalho mostram ser capazes de remover a calamina, havendo algumas diferenças no grau de remoção entre elas. No entanto, o aspeto e a rugosidade da superfície metálica diferem bastante de processo para processo;
- (ii) A técnica de jateamento erosivo por via seca leva à formação de resíduos de agente erosivo (alumina ou carboneto de silício) que ficam incrustados na superfície do substrato, ou seja, a superfície metálica fica contaminada com estes compostos;
- (iii) A técnica de jateamento com água a alta pressão é aquela que parece ser menos adequada para o efeito pretendido dado que as condições de remoção da calamina provocam uma agressão significativa da superfície da chapa. Além disso obrigaria ao uso de inibidores de corrosão para evitar a oxidação da chapa devido ao uso de água;
- (iv) A técnica de jateamento erosivo por via húmida leva à formação de resíduos de agente erosivo (monticellite) na superfície do substrato, tal como acontece na técnica de jateamento erosivo por via seca. No entanto, os resultados obtidos em termos de rugosidade são piores do que os obtidos por jateamento erosivo por via seca e jateamento com água a alta pressão;
- (v) O método de escovagem rotativa com escovas ou lamelas de manta abrasiva mostra ser uma boa opção para a remoção do filme de óxidos, uma vez que se garante completa remoção da calamina. Além do mais, é a técnica que proporciona melhor acabamento superficial, com valores mínimos de rugosidade;
- (vi) A ablação laser garante igualmente a remoção de calamina e valores de rugosidade reduzidos. No entanto, a superfície fica marcada com linhas horizontais associadas à trajetória percorrida pelo feixe do laser, o que poderá obrigar ao recurso a uma outra técnica de acabamento, por exemplo escovas rotativas. Além disso, o controlo dos parâmetros do processo é crítico, para não ocorrer sobrefusão da superfície.

Bibliografia

- [1] C. M. Soares. *Análise de Bobines de Aço em Serviços Siderúrgicos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica (MIEM), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), 2008;
- [2] A. V. de Seabra. *Metalurgia Geral, Vol. II*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, 1981;
- [3] E. B. Filho, I. B. da Silva, G. F. Batalha, S. T. Button. *Conformação Plástica dos Metais*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), 2011;
- [4] A. Scheid. *Curso Básico de Aços*. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010;
- [5] H. Xian-jun, Z. Bi-ming, C. Shao-hui, F. Feng, J. Jian-qing. *Oxide scale Growth on High Carbon Steel at High Temperatures*. Journal of Iron and Steel Research International, 20, 47-52, 2013;
- [6] EN 10025-1:2004 - *Hot rolled products of structural steels - Part 1 - General technical delivery conditions*;
- [7] EN 10025-2:2004 – *Hot rolled products of structural steels – Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels*;
- [8] M. I. M. Hernández. *Aplicación Tecnológica de un Residuo de la Industria del Acero en la Eliminación de Metales Contaminantes*. Tese de Doutoramento em Ciência dos Materiais e Engenharia Metalúrgica, Universidade Complutense de Madrid, 2004;
- [9] J. R. Cuellar. *Cinetica de Crecimiento, Mecanismos de Remocion Y Morfologia Del Oxido de Hierro en Aceros Laminados en una Planta Compacta de Productod Planos*. Tese de Doutoramento em Engenharia de Materiais, Universidade Autónoma de Nuevo Leon, 2005;
- [10] J. Gonzalez, J. Liano, J. García. *Metallurgical Application to Work and Back up Rolls for Hot & Cold Rolling of Flat Products*. International Workshop on “Rolls for Flat Rolling of Steel” at JSW Steel, Bellary, 2007;
- [11] A. Esguerra, O. Vanegas, M. Fajardo, W. Barona, H. Sánchez. *Evaluación de la Reducibilidad de la Calamina Proveniente de una Siderúrgica de la Región, por Reducción con Monóxido de Carbono*. Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, S1, 1289-1294, 2009;

- [12] W. Sun. *A Study on the Characteristics of Oxide scale in hot Rolling of Steel*. Tese de Doutorado, University of Wollongong Thesis Collections, 2005;
- [13] J.-J. M. Ndiabintu. *Effect of Mould Flux on Scale Adhesion to Reheated Stainless Steel Slabs*. Tese de Mestrado, University of Pretoria, South Africa, 2008;
- [14] W. M. C. Melfo. *Analysis of hot rolling events that lead to buckle defect in steel strips*. Tese de Doutorado, University of Wollongong Thesis Collection, 2006;
- [15] S. Jie, W. De-Ren, H. Ye-dong, Q. Hui-bin, W. Gao. *Reduction of oxide scale on hot-rolled strip steels by carbon monoxide*. *Materials Letters* 62, 3500–3502, 2008;
- [16] R. Y. Chen, W. Y. D. Yuent. *A study of the Scale Structure of Hot-Rolled Steel Strip by Simulated Coiling and Cooling*. *Oxidation of Metals* 53, 539-560, 2000;
- [17] R. Y. Chen, W. Y. D. Yuent. *Oxide-Scale Structures Formed on Commercial Hot-Rolled Steel Strip and Their Formation Mechanisms*. *Oxidation of Metals*, 56, 89-118, 2001;
- [18] X. Yu, Z. Jiang, X. Wang, D. Wei, Q. Yang. *Effect of Coiling Temperature on Oxide Scale of Hot-Rolled Strip*. *Advanced Materials Research*, 415-417, 853-858, 2012;
- [19] R. Y. Chen, W. Y. D. Yuent. *Review of the high-Temperature Oxidation of Iron and Carbon Steels in Air or Oxygen*. *Oxidation of Metals*, 59, 433-433, 2003;
- [20] E.-J. Song. *High Temperature Oxidation of Si-Containing Steel*. Tese de Mestrado, Pohang University of Science and Technology, 2011;
- [21] W. Yu, C. Wang, L Wang, J. Chen, Y.-J. Hui, C. Sun. *Combination Effect of Si and P on Tertiary Scale Characteristic of Hot Rolled Strip*. *Journal of Iron and Steel Research International*, 22, 232-237, 2015;
- [22] G. C. Caser. *Influência do Tipo de Abrasivo de Jateamento no Desempenho de Esquemas de Pintura Sobre Aço Carbono*. Dissertação de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, 2008;
- [23] ISO 8501, *Corrosion Protection of Steel Structures by Painting*, 2011;
- [24] M. Graziani. *The Mechanical Descaling in the Low Carbon Wires Production*. ANTAAC, Italy, 2009. Disponível em: <http://www.antaac.org.mx/assets/04-influenciaproductividaddecapado.pdf>;

- [25] P. Gillstrom, M. Jarl. *Mechanical Descaling of Wire Rod Using Reverse Bending and Brushing*. Journal of Materials Processing Technology 172, 332–340, 2006;
- [26] P. Bansal, R. Gandhi. *Aspects of shot Blasting over Pickling for Metal Drawing Process*. International Journal of Mechanical and Production Engineering 2, 2320-2092, 2014;
- [27] K. Voges, A. Mueth. *Eco-Pickled Surface: An Environmentally Advantageous Alternative to Conventional Acid Pickling*. Conference Proceedings on “The Iron & Steel Technology”, 2007;
- [28] P. E. Lafargue, N. Chaoui, E. Millon, J. F. Muller, H. Derule, A. Popadenec. *The Laser Ablation/Desortion Process used as a new Method for Cleaning Treatment of Low Carbon Steel Sheets*. Surface and Coatings Technology 106, 268–276, 1998;
- [29] J. M. Lee, K. G. Watkins. *In-Process Monitoring Techniques for Laser Cleaning*. Optics and Lasers in Engineering 34, 429-442, 2000;
- [30] M. Maanonen. *Steel Pickling in Challenging Conditions*. Bachelor of Engineering, Helsinki Metropolia University of Applied Sciences, 2014;
- [31] Blasting Technical Information. Disponível em:
<http://mcfinishing.com/resources/blastingtech.pdf>;
- [32] A. W. Mallory. *Guidelines for Centrifugal Blast Cleaning*, Steel Structures Painting Council, 1984;
- [33] Paint Guide – Surface Preparation. Abolin Co, 2011. Disponível em:
http://www.abolinco.com/downloads/downloads/ABOLIN_CO_GUIDE_METAL_SURFACE_PREPARATION.pdf
- [34] L. Bending, M. Raudensky, J. Horsky. *Descaling with High Pressure Nozzles*. ILASS-Europe, Zurich, 2-6- September, 2001.
- [35] A. T. Sheridan, P. Simon. *Descaling of Steels in Rolling Mills*. Proceedings of Forum on European Steelmaking Developments and Perspectives, 233-244, Luxemburgo, 1995;
- [36] Y. S. Koh. *Laser Cleaning as a Conservation Technique for Corroded Metal Artifacts*. Tese de Doutorado, Lulea University of Technology, 2006;

[37] G. X. Chen, T. J. Kwee, K. P. Tan, Y. S. Choo, M. H. Hong. *High-Power Fibre Laser Cleaning for Green Shipbuilding*. *Journal of Laser Micro/Nanoengineering* 7, 249–253, 2012;

Anexos:

Anexo A: The European Standard EN 10025-2:2004. ^[7]

Designation		Method of deoxidation ^b	C in % max. for nominal product thickness in mm			Si % max.	Mn % max.	P % max.	S % max.	N % max.	Cu % max.	Other % max.
According EN 10027-1 and CR 10260	According EN 10027-2		≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40 ^c							
S235JR	1.0038	FN	0,17	0,17	0,20	-	1,40	0,035	0,035	0,012	0,55	-
S235J0	1.0114	FN	0,17	0,17	0,17	-	1,40	0,030	0,030	0,012	0,55	-
S235J2	1.0117	FF	0,17	0,17	0,17	-	1,40	0,025	0,025	-	0,55	-
S275JR	1.0044	FN	0,21	0,21	0,22	-	1,50	0,035	0,035	0,012	0,55	-
S275J0	1.0143	FN	0,18	0,18	0,18 ^d	-	1,50	0,030	0,030	0,012	0,55	-
S275J2	1.0145	FF	0,18	0,18	0,18 ^d	-	1,50	0,025	0,025	-	0,55	-
S355JR	1.0045	FN	0,24	0,24	0,24	0,55	1,60	0,035	0,035	0,012	0,55	-
S355J0	1.0553	FN	0,20 ^e	0,20 ^a	0,22	0,55	1,60	0,030	0,030	0,012	0,55	-
S355J2	1.0577	FF	0,20 ^e	0,20 ^a	0,22	0,55	1,60	0,025	0,025	-	0,55	-
S355K2	1.0596	FF	0,20 ^e	0,20 ^a	0,22	0,55	1,60	0,025	0,025	-	0,55	-
S450J ^g	1.0590	FF	0,20	0,20 ^a	0,22	0,55	1,70	0,030	0,030	0,025	0,55	^m

^a See 7.2.

^b FN = rimming steels not permitted; FF = fully killed steel (see 6.2.2).

^c For sections with nominal thickness > 100 mm the C content by agreement.

See option 26.

^d For long products the P and S content can be 0,005 % higher.

^e For long products the max. S content can be increased for improved machinability by 0,015 % by agreement if the steel is treated to modify the sulphide morphology and the chemical composition shows min. 0,0020 % Ca.

See option 27.

^f The max. value for nitrogen does not apply if the chemical composition shows a minimum total Al content of 0,020 % or alternatively min. 0,015 % acid soluble Al or if sufficient other N binding elements are present. In this case the N binding elements shall be mentioned in the inspection document.

^g Cu content above 0,40 % may cause hot shortness during hot forming.

^h If other elements are added, they shall be mentioned on the inspection document.

ⁱ For nominal thickness > 150 mm: C = 0,20 % max..

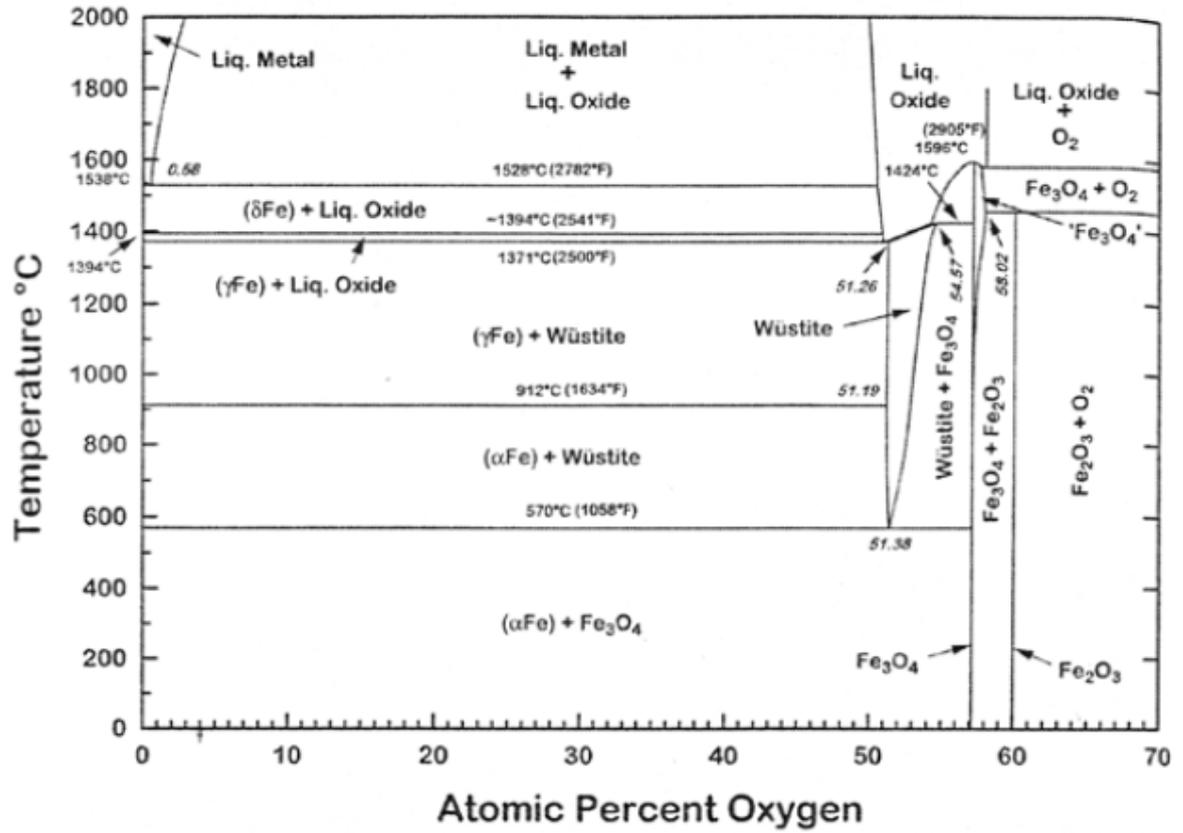
^j For grades suitable for cold roll forming (see 7.4.2.2.3): C = 0,22 % max..

^k For nominal thickness > 30 mm: C = 0,22 % max..

^l Applicable for long products only.

^m The steel may show a Nb content of max. 0,05 %, a V content of max. 0,13 % and a Ti content of max. 0,05 %.

Anexo B: Diagrama de fases de equilibrio Fe-O. [14]



Anexo C: O espectro eletromagnético e exemplos de lasers utilizados a diferentes frequências. ^[35]

