

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO E PREDIÇÃO DA QUALIDADE DE CORTE DE ÁGATA  
POR JATO ABRASIVO DE ÁGUA

por

Carlos Edmundo de Abreu e Lima Ipar

Tese para obtenção do Título de  
Doutor em Engenharia

Porto Alegre, Outubro de 2018

CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO E PREDIÇÃO DA QUALIDADE DE CORTE DE ÁGATA  
POR JATO ABRASIVO DE ÁGUA

por

Carlos Edmundo de Abreu e Lima Ipar  
Mestre em Design

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Doutor em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

Aprovada por:

Prof. Dr. -Ing. Walter Linfolfo Weingaertner .....POSMEC / UFSC

Prof. Dr. André João de Souza .....PROMECC / UFRGS

Prof. Dra. Lauren da Cunha Duarte .....PPGGEO / PGDESIGN / UFRGS

Prof. Dr. Eduardo André Perondi  
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 26 de Outubro de 2018

## RESUMO

A avaliação da qualidade da superfície resultante do processo de corte a jato de água abrasiva (AWJ), bem como sua predição com base nos parâmetros de processo, têm motivado diversos estudos ao longo dos últimos 30 anos. Neste trabalho, aborda-se a investigação da influência dos parâmetros de processo AWJ na qualidade resultante associada ao corte de ágata, material gemológico de grande volume de produção no Estado do Rio Grande do Sul. A literatura especializada apresenta diferentes abordagens para a classificação da qualidade do corte associado ao processo AWJ, mas verifica-se que não há consenso entre os pesquisadores sobre a forma de classificar esta qualidade. Neste trabalho, apresenta-se um novo método para a classificação da qualidade, denominado critério de qualidade de percepção visual ( $Q_v$ ), que representa, em termos percentuais, a quantidade da porção de superfície suavizada em relação à espessura total da peça. A partir desta definição, foram realizados quatro grupos de experimentos, onde se buscou medir a influência da velocidade de avanço, vazão mássica de abrasivo, pressão de trabalho e distância de afastamento da tubeira (variáveis de entrada) sobre a qualidade de percepção visual, largura de fenda, desvio de perpendicularidade, rugosidade e tempo de perfuração (variáveis de saída) em chapas finas e grossas de ágata através do processo AWJ. Os experimentos foram planejados a partir de um projeto central compósito, o que possibilitou a realização de análises de variância e a obtenção de modelos de regressão para todas as variáveis envolvidas. Os principais resultados indicam que, para chapas grossas de ágata, a influência dos parâmetros de processo é maior do que a observada em chapas finas, devido à maior interação entre o jato e o material causado pelo aumento da espessura da peça. Ainda, verifica-se que os fatores de processo que apresentam maiores mudanças sobre as variáveis de saída são a velocidade de avanço e a vazão mássica de abrasivo. Os modelos de regressão foram implementados em rotina computacional para facilitar sua utilização prática. De maneira geral, acredita-se que o critério de qualidade de percepção visual  $Q_v$  traz ganhos para a avaliação prática do processo, facilitando a sua classificação e possibilitando melhor compreensão entre os setores envolvidos.

Palavras-chave: Jato d'água abrasiva; Ágata; Qualidade; Predição.

## ABSTRACT

The evaluation of the surface quality resulting from the abrasive water jet cutting process (AWJ), as well as its prediction methods based on the process parameters, have motivated several studies over the last 30 years. In the present paper, it is offered an investigation of the influence of AWJ process parameters on the resulting quality associated to the agate cutting, a gemological material of great volume of production at Rio Grande do Sul. The specialized literature presents different approaches for the classification of the quality of cut performed with AWJ process, but it turns out that there is no consensus among researchers on how to classify such quality. In this work, a new method for the classification of quality is presented, called quality criterion of visual perception ( $Q_v$ ). This parameter represents, in percentage terms, the portion of the smoothed surface in relation to the total thickness of the piece. From this definition, four groups of experiments were carried out to measure the influence of traverse speed, abrasive mass flow rate, working pressure and afastamento da tubeira distance (input variables) on the quality of visual perception, kerf width, perpendicularity deviation, surface roughness and drilling time (output variables) in thin and thick plates of agate through the AWJ process. The experiments were designed from a central composite design which made possible the analysis of variance and the obtaining of regression models for all variables involved. The main results indicate that, for the thicker agate plates, the influence of the process parameters is higher than that observed in thin plates. It is due to the greater interaction between the jet and the material caused by the increased thickness of the piece. Also, it is observed that the process factors that most affected the output variables were the traverse speed and the abrasive mass flow rate. The regression models were implemented in a computational routine to facilitate their practical use. In general, it is believed that the quality criterion of visual perception ( $Q_v$ ) brings gains for the practical evaluation of the process, facilitating its classification and enabling better understanding among the involved sectors.

Keywords: Abrasive Water Jet; Agate; Quality; Prediction.

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivos .....	2
1.2	Organização do trabalho .....	3
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>4</b>
2.1	Material de Estudo – Água .....	4
2.1.1	Extração e beneficiamento de água .....	6
2.2	Processo de corte a jato de água com abrasivo – AWJ .....	8
2.2.1	Componentes e funcionamento de um processo AWJ .....	8
2.3	Especificações geométricas da peça processada por AWJ .....	11
2.4	Qualidade da superfície de corte por AWJ .....	13
2.4.1	Modelos descritivos de qualidade de corte por AWJ .....	14
2.5	Avaliação da rugosidade no processo AWJ .....	18
2.6	Avaliação da largura de fenda no processo AWJ.....	28
2.7	Perfuração no processo AWJ.....	29
2.8	Jato de água com abrasivo em materiais cerâmicos e rochas .....	30
2.9	Considerações sobre a revisão bibliográfica .....	32
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>35</b>
3.1	Metodologia de execução do trabalho .....	35
3.2	Materiais, equipamentos e softwares .....	36
3.3	Procedimento de medição das variáveis de resposta .....	38
3.3.1	Medição da espessura das peças de trabalho .....	39

3.3.2	Medição da rugosidade .....	39
3.3.3	Medição da altura da zona suavizada .....	40
3.3.4	Medição da largura de fenda e desvio de perpendicularidade .....	41
3.3.5	Medição do tempo de perfuração .....	44
3.4	Determinação do critério de qualidade de percepção visual .....	44
3.5	Procedimento experimental .....	45
3.5.1	Descrição de fatores e níveis de interesse .....	46
3.5.2	Definição do projeto do experimento e sequência de execução das amostras .....	48
3.6	Definição do modelos de regressão e análise dos dados .....	53
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>55</b>
4.1	Estudo preliminar sobre corte via AWJ em ágata .....	55
4.2	Experimento de perfuração .....	56
4.3	Experimento de corte .....	60
4.3.1	Espessura das peças do experimento de corte.....	60
4.3.2	Rugosidade .....	61
4.3.3	Altura da zona suavizada .....	63
4.3.4	Qualidade de percepção visual .....	66
4.3.5	Largura de fenda e desvio de perpendicularidade .....	67
4.4	Análise estatística .....	69
4.4.1	Qualidade de percepção visual .....	69
4.4.2	Largura de fenda .....	73
4.4.3	Desvio de perpendicularidade .....	78
4.4.4	Rugosidade média .....	83
4.5	Modelos de Regressão .....	87

4.5.1	Qualidade de percepção visual .....	88
4.5.2	Largura de fenda .....	91
4.5.3	Perpendicularidade .....	93
4.5.4	Rugosidade média .....	95
4.6	Metodologia de definição de parâmetros .....	99
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>104</b>
5.1	Ensaio preliminares .....	104
5.2	Considerações sobre os objetivos .....	104
5.3	Conclusões .....	106
5.4	Sugestões para trabalhos futuros .....	107
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>109</b>
<b>APÊNDICE A</b>	<b>Perfis de rugosidade .....</b>	<b>115</b>
<b>APÊNDICE B</b>	<b>Dados de rugosidade .....</b>	<b>188</b>
<b>APÊNDICE C</b>	<b>Medições de zona suavizada.....</b>	<b>191</b>
<b>APÊNDICE D</b>	<b>Imagens de medição da largura de fenda (kw) e desvio de perpendicularidade (u).....</b>	<b>204</b>
<b>APÊNDICE E</b>	<b>Gráficos de superfície de resposta e de contorno para o comportamento dos modelos de regressão gerados a partir dos experimentos de corte realizados.....</b>	<b>219</b>

<b>APÊNDICE F</b>	<b>Medições de qualidade de percepção visual (<math>Q_v</math>), largura de fenda (<math>k_w</math>), desvio de perpendicularidade (<math>u</math>).....</b>	<b>239</b>
-------------------	--	------------

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Exemplos de produtos comercializados em ágata. ....	1
Figura 1.2	Exemplos de produtos confeccionados em ágata a utilizando o processo AWJ.2	
Figura 2.1	Mapa gemológico da região sul do Brasil.....	4
Figura 2.2	Formas usuais de comercialização da ágata na região sul do Brasil.....	5
Figura 2.3	Exemplos de região de massa e de sal em chapas de ágata. ....	6
Figura 2.4	Etapas da cadeia produtiva do beneficiamento da ágata.....	7
Figura 2.5	Etapas da cadeia produtiva do beneficiamento da ágata.....	7
Figura 2.6	Diagrama básico de funcionamento de um sistema de corte por jato de água e abrasivo. ....	9
Figura 2.7	Cabeçote típico de jato de água. ....	10
Figura 2.8	Grandezas características de avaliação do corte por AWJ.....	12
Figura 2.9	Nomenclatura da geometria da fenda. ....	12
Figura 2.10	Características do corte a jato de água e abrasivo.....	13
Figura 2.11	Evolução da forma da fenda no processo AWJ.. ....	14
Figura 2.12	Estudos encontrados relacionados a rugosidade no processo AWJ.....	20
Figura 2.13	Comportamento da rugosidade como função da variação da espessura para a variação da velocidade de avanço e pressão de corte empregando o modelo de Kovacevic. ....	21
Figura 2.14	Comportamento da rugosidade como função da espessura de corte para a variação do tamanho do grão abrasivo e da vazão mássica de abrasivo empregando o modelo de do modelo de Kovacevic. ....	22
Figura 2.15	Comportamento da rugosidade como função da espessura do componente para diversas velocidades de corte e pressões da água empregando o modelo de Ramulu e Arola.....	23
Figura 2.16	Comportamento da rugosidade como função da espessura do componente para diferentes tamanhos de partículas e distâncias de afastamento da tubeira empregando o modelo do modelo de Ramulu e Arola.. ....	23
Figura 2.17	Comportamento da rugosidade como função da variação na pressão, velocidade de avanço e vazão de abrasivo, empregando o modelo de regressão de Çaydas e Haşçalık.....	24

Figura 2.18	Comportamento da rugosidade como função do tamanho de partícula e distância de afastamento da tubeira, empregando o modelo de regressão de Çaydas e Hasçalık.....	25
Figura 2.19	Comportamento da rugosidade como função da espessura e do diâmetro de foco empregando o modelo de Zhang.....	26
Figura 2.20	Comportamento da rugosidade como função da variação da pressão e do índice de qualidade, empregando o modelo de Zhang..	27
Figura 3.1	Metodologia de execução do trabalho. ....	35
Figura 3.2	Máquina de corte por jato de água abrasivo utilizada nos experimentos. ....	36
Figura 3.3	Exemplos de chapas de ágata utilizada no experimento.....	37
Figura 3.4	Rugosímetros utilizados nos experimentos.....	37
Figura 3.5	Microtomografia de raios-X..	38
Figura 3.6	Procedimento de medição de rugosidade.....	40
Figura 3.7	Exemplo de perfil de rugosidade construído a partir dos dados coletados. ....	40
Figura 3.8	Medição da altura de zona suavizada.....	40
Figura 3.9	Exemplo de medição do desvio de perpendicularidade.....	42
Figura 3.10	Exemplo de amostras obtidas via digitalização tridimensional em microtomógrafo de raios-X.....	43
Figura 3.11	Exemplo de extração de seções transversais para medição da largura de fenda e desvio de perpendicularidade.....	43
Figura 3.12	Medição da largura de fenda e do desvio de perpendicularidade. ....	43
Figura 3.13	Representação do processo de medição do tempo de perfuração em ágata via AWJ..	44
Figura 3.14	Exemplo de aplicação do critério de qualidade de percepção visual $Q_v$ .....	45
Figura 3.15	Diagrama causa efeito para o processo de corte via AWJ.....	46
Figura 3.16	Representação esquemática dos grupos de experimentos realizados durante o desenvolvimento do trabalho. ....	48
Figura 3.17	Projetos compostos centrais para dois e três fatores.....	51
Figura 4.1	Rugosidade média $R_a$ medida nos ensaios preliminares..	55
Figura 4.2	Gráfico de efeitos principais o tempo de perfuração via AWJ em ágata – etapa exploratória. ....	58
Figura 4.3	Gráficos de efeitos principais para o tempo de perfuração - etapa detalhada...	59

Figura 4.4	Comportamento do modelo de predição do tempo de perfuração em chapas de ágata pelo processo AWJ. ....	60
Figura 4.5	Espessura média das amostras utilizadas nos experimentos. ....	61
Figura 4.6	Perfis de rugosidade coletadas no topo e fundo da superfície. ....	62
Figura 4.7	Gráfico comparativo sobre a percepção de diferentes operadores para a medição da altura da zona suavizada em dez amostras de ágata recortadas via AWJ. ...	64
Figura 4.8	Rugosidade $Ra$ média estimada na área de transição suave/ondulada. ....	65
Figura 4.9	Comparativo entre a rugosidade média $Ra$ na área de transição estimada por diferentes operadores em 10 amostras de ágata cortadas via AWJ. ....	66
Figura 4.10	Diagrama de Pareto para nível de qualidade $Q_v$ no corte com jato abrasivo de chapas finas de ágata com espessura média de 5,3 mm. ....	70
Figura 4.11	Efeitos das variáveis de entrada sobre a média do nível de qualidade $Q_v$ em chapas finas de ágata com espessura média de 5,3 mm. ....	71
Figura 4.12	Diagrama de Pareto para nível de qualidade $Q_v$ no corte com jato abrasivo de chapas grossas de ágata com espessura média de 13,7 mm. ....	72
Figura 4.13	Efeitos das variáveis de entrada sobre a média do nível de qualidade $Q_v$ em chapas grossas de ágata com espessura média de 13,7 mm. ....	73
Figura 4.14	Diagrama de Pareto para largura de fenda $kW$ obtida no corte com jato abrasivo de chapas finas de ágata com espessura média de 5,3 mm. ....	75
Figura 4.15	Efeitos das variáveis de entrada sobre a média largura de fenda $kW$ em chapas finas de ágata com espessura média de 5,3 mm. ....	75
Figura 4.16	Diagrama de Pareto para largura de fenda $kW$ obtida no corte com jato abrasivo de chapas grossas de ágata com espessura média de 13,7 mm. ....	77
Figura 4.17	Efeitos das variáveis de entrada sobre a média largura de fenda $kW$ em chapas grossas de ágata com espessura média de 13,7 mm. ....	77
Figura 4.18	Diagrama de Pareto para o desvio de perpendicularidade $u$ medido no corte com jato abrasivo de chapas finas de ágata com espessura média de 5,3 mm. ....	79
Figura 4.19	Efeitos das variáveis de entrada sobre a média do desvio de perpendicularidade $u$ medido em chapas finas de ágata com espessura média de 5,3 mm. ....	79
Figura 4.20	Gráfico de interações para o desvio de perpendicularidade $u$ em chapas finas de ágata. ....	80
Figura 4.21	Diagrama de Pareto para o desvio de perpendicularidade $u$ medido no corte com jato abrasivo de chapas grossas de ágata com espessura média de 13,7 mm. ..	82

Figura 4.22	Efeitos das variáveis de entrada sobre a média do desvio de perpendicularidade $u$ medido em chapas grossas de ágata com espessura média de 13,7 mm.....	82
Figura 4.23	Diagrama de Pareto para a rugosidade média $Ra$ medida no corte com jato abrasivo de chapas finas de ágata com espessura média de 5,3 mm. ....	84
Figura 4.24	Efeitos das variáveis de entrada sobre a média da rugosidade média $Ra$ medida em chapas finas de ágata com espessura média de 5,3 mm.....	84
Figura 4.25	Diagrama de Pareto para a rugosidade média $Ra$ medida no corte com jato abrasivo de chapas grossas de ágata com espessura média de 13,7 mm. ....	86
Figura 4.26	Efeitos das variáveis de entrada sobre a média da rugosidade média $Ra$ medida em chapas grossas de ágata com espessura média de 13,7 mm.....	86
Figura 4.27	Comportamento do modelo de predição no nível de qualidade de percepção visual $Q_v$ para o corte AWJ em chapas finas de ágata com espessura média de 5,3 mm. ....	89
Figura 4.28	Comportamento do modelo de predição no nível de qualidade de percepção visual $Q_v$ para o corte AWJ em chapas grossas de ágata com espessura média de 13,7 mm. ....	90
Figura 4.29	Comportamento do modelo de predição da largura de fenda $kW$ no corte AWJ em chapas finas de ágata com espessura média de 5,3 mm.....	91
Figura 4.30	Comportamento do modelo de predição da largura de fenda $kW$ no corte AWJ em chapas grossas de ágata com espessura média de 13,7 mm.....	92
Figura 4.31	Comportamento do modelo de predição do desvio de perpendicularidade $u$ no corte AWJ em chapas finas de ágata com espessura média de 5,3 mm.....	93
Figura 4.32	Comportamento do modelo de predição do desvio de perpendicularidade $u$ no corte AWJ em chapas grossas de ágata com espessura média de 13,7 mm.....	94
Figura 4.33	Comportamento do modelo de predição da rugosidade média $Ra$ no corte com AWJ em chapas finas de ágata com espessura média de 5,3 mm, no topo da superfície de corte. ....	95
Figura 4.34	Comportamento do modelo de predição da rugosidade média $Ra$ no corte AWJ em chapas finas de ágata com espessura média de 5,3 mm, no fundo da superfície de corte.....	96
Figura 4.35	Comportamento do modelo de predição da rugosidade média $Ra$ no corte AWJ em chapas grossas de ágata com espessura média de 13,7 mm, no topo da superfície de corte. ....	97

Figura 4.36	Comportamento do modelo de predição da rugosidade média $Ra$ no corte AWJ em chapas grossas de ágata com espessura média de 13,7 mm, no fundo da superfície de corte. ....	98
Figura 4.37	Metodologia de seleção de parâmetros de processo AWJ em ágata.....	101
Figura 4.38	Implementação em MATLAB da metodologia de seleção de parâmetros do processo AWJ em ágata. ....	102
Figura 4.39	Implementação em MATLAB dos modelos de predição de parâmetros do processo AWJ para chapas finas e grossas de ágata. ....	102
Figura C.1	Amostra 01.....	192
Figura C.2	Amostra 02.....	192
Figura C.3	Amostra 03.....	192
Figura C.4	Amostra 04.....	192
Figura C.5	Amostra 05.....	192
Figura C.6	Amostra 06.....	193
Figura C.7	Amostra 07.....	193
Figura C.8	Amostra 08.....	193
Figura C.9	Amostra 09.....	193
Figura C.10	Amostra 10.....	193
Figura C.11	Amostra 11.....	194
Figura C.12	Amostra 12.....	194
Figura C.13	Amostra 13.....	194
Figura C.14	Amostra 14.....	194
Figura C.15	Amostra 15.....	194
Figura C.16	Amostra 16.....	195
Figura C.17	Amostra 17.....	195
Figura C.18	Amostra 18.....	195
Figura C.19	Amostra 19.....	195
Figura C.20	Amostra 20.....	195
Figura C.21	Amostra 21.....	195
Figura C.22	Amostra 22.....	196
Figura C.23	Amostra 23.....	196
Figura C.24	Amostra 24.....	196
Figura C.25	Amostra 25.....	196

Figura C.26	Amostra 26.....	196
Figura C.27	Amostra 27.....	196
Figura C.28	Amostra 28.....	196
Figura C.29	Amostra 29.....	197
Figura C.30	Amostra 30.....	197
Figura C.31	Amostra 31.....	197
Figura C.32	Amostra 32.....	197
Figura C.33	Amostra 33.....	197
Figura C.34	Amostra 34.....	197
Figura C.35	Amostra 35.....	197
Figura C.36	Amostra 36.....	198
Figura C.37	Amostra 37.....	198
Figura C.38	Amostra 38.....	198
Figura C.39	Amostra 39.....	198
Figura C.40	Amostra 40.....	198
Figura C.41	Amostra 41.....	198
Figura C.42	Amostra 42.....	198
Figura C.43	Amostra 43.....	199
Figura C.44	Amostra 44.....	199
Figura C.45	Amostra 45.....	199
Figura C.46	Amostra 46.....	199
Figura C.47	Amostra 47.....	199
Figura C.48	Amostra 48.....	199
Figura C.49	Amostra 49.....	199
Figura C.50	Amostra 50.....	200
Figura C.51	Amostra 51.....	200
Figura C.52	Amostra 52.....	200
Figura C.53	Amostra 53.....	200
Figura C.54	Amostra 54.....	200
Figura C.55	Amostra 55.....	200
Figura C.56	Amostra 56.....	200
Figura C.57	Amostra 57.....	201
Figura C.58	Amostra 58.....	201

Figura C.59	Amostra 59.....	201
Figura C.60	Amostra 60.....	201
Figura C.61	Amostra 61.....	201
Figura C.62	Amostra 62.....	201
Figura C.63	Amostra 63.....	201
Figura C.64	Amostra 64.....	202
Figura C.65	Amostra 65.....	202
Figura C.66	Amostra 66.....	202
Figura C.67	Amostra 67.....	202
Figura C.68	Amostra 68.....	202
Figura C.69	Amostra 69.....	202
Figura C.70	Amostra 70.....	202
Figura C.71	Amostra 71.....	203
Figura C.72	Amostra 72.....	203
Figura C.73	Amostra 73.....	203
Figura C.74	Amostra 74.....	203
Figura C.75	Amostra 75.....	203
Figura C.76	Amostra 76.....	203
Figura C.77	Amostra 77.....	203
Figura C.78	Amostra 78.....	204
Figura C.79	Amostra 79.....	204
Figura C.80	Amostra 80.....	204
Figura D.1	Amostra 01.....	205
Figura D.2	Amostra 02.....	205
Figura D.3	Amostra 03.....	205
Figura D.4	Amostra 04.....	205
Figura D.5	Amostra 05.....	206
Figura D.6	Amostra 06.....	206
Figura D.7	Amostra 07.....	206
Figura D.8	Amostra 08.....	206
Figura D.9	Amostra 09.....	207
Figura D.10	Amostra 10.....	207
Figura D.11	Amostra 11.....	207

Figura D.12	Amostra 12.....	207
Figura D.13	Amostra 13.....	208
Figura D.14	Amostra 14.....	208
Figura D.15	Amostra 15.....	208
Figura D.16	Amostra 16.....	208
Figura D.17	Amostra 17.....	209
Figura D.18	Amostra 18.....	209
Figura D.19	Amostra 19.....	209
Figura D.20	Amostra 20.....	209
Figura D.21	Amostra 21.....	210
Figura D.22	Amostra 22.....	210
Figura D.23	Amostra 23.....	210
Figura D.24	Amostra 24.....	210
Figura D.25	Amostra 25.....	210
Figura D.26	Amostra 26.....	210
Figura D.27	Amostra 27.....	210
Figura D.28	Amostra 28.....	210
Figura D.29	Amostra 29.....	211
Figura D.30	Amostra 30.....	211
Figura D.31	Amostra 31.....	211
Figura D.32	Amostra 32.....	211
Figura D.33	Amostra 33.....	211
Figura D.34	Amostra 34.....	211
Figura D.35	Amostra 35.....	211
Figura D.36	Amostra 36.....	211
Figura D.37	Amostra 37.....	212
Figura D.38	Amostra 38.....	212
Figura D.39	Amostra 39.....	212
Figura D.40	Amostra 40.....	212
Figura D.41	Amostra 41.....	212
Figura D.42	Amostra 42.....	212
Figura D.43	Amostra 43.....	213
Figura D.44	Amostra 44.....	213

Figura D.45	Amostra 45.....	213
Figura D.46	Amostra 46.....	213
Figura D.47	Amostra 47.....	213
Figura D.48	Amostra 48.....	214
Figura D.49	Amostra 49.....	214
Figura D.50	Amostra 50.....	214
Figura D.51	Amostra 51.....	214
Figura D.52	Amostra 52.....	214
Figura D.53	Amostra 53.....	215
Figura D.54	Amostra 54.....	215
Figura D.55	Amostra 55.....	215
Figura D.56	Amostra 56.....	215
Figura D.57	Amostra 57.....	215
Figura D.58	Amostra 58.....	216
Figura D.59	Amostra 59.....	216
Figura D.60	Amostra 60.....	216
Figura D.61	Amostra 61.....	216
Figura D.62	Amostra 62.....	216
Figura D.63	Amostra 63.....	217
Figura D.64	Amostra 64.....	217
Figura D.65	Amostra 65.....	217
Figura D.66	Amostra 66.....	217
Figura D.67	Amostra 67.....	217
Figura D.68	Amostra 68.....	217
Figura D.69	Amostra 69.....	217
Figura D.70	Amostra 70.....	217
Figura D.71	Amostra 71.....	218
Figura D.72	Amostra 72.....	218
Figura D.73	Amostra 73.....	218
Figura D.74	Amostra 74.....	218
Figura D.75	Amostra 75.....	218
Figura D.76	Amostra 76.....	218
Figura D.77	Amostra 77.....	218

Figura D.78	Amostra 78.....	218
Figura D.79	Amostra 79.....	219
Figura D.80	Amostra 80.....	219
Figura E.1	Gráficos de superfície de resposta para a qualidade da superfície usinada por AWJ em chapas finas de ágata.....	220
Figura E.2	Gráficos de contorno para a qualidade da superfície usinada por AWJ em chapas finas de ágata.....	221
Figura E.3	Gráficos de superfície de resposta para a qualidade da superfície usinada por AWJ em chapas grossas de ágata. ....	222
Figura E.4	Gráficos de contorno para a qualidade da superfície usinada por AWJ em chapas grossas de ágata. ....	223
Figura E.5	Gráficos de superfície de resposta para a largura de fenda usinada por AWJ em chapas finas de ágata. ....	224
Figura E.6	Gráficos de contorno para a largura de fenda usinada por AWJ em chapas finas de ágata. ....	225
Figura E.7	Gráficos de superfície de resposta para a largura de fenda usinada por AWJ em chapas grossas de ágata. ....	226
Figura E.8	Gráficos de contorno para a largura de fenda usinada por AWJ em chapas grossas de ágata. ....	227
Figura E.9	Gráficos de superfície de resposta para o desvio de perpendicularidade em chapas finas de ágata usinada por AWJ. ....	228
Figura E.10	Gráficos de contorno para o desvio de perpendicularidade em chapas finas de ágata usinada por AWJ. ....	229
Figura E.11	Gráficos de superfície de resposta para o desvio de perpendicularidade em chapas grossas de ágata usinada por AWJ. ....	230
Figura E.12	Gráficos de contorno para o desvio de perpendicularidade em chapas grossas de ágata usinada por AWJ.....	231
Figura E.13	Gráficos de superfície de resposta para a rugosidade Ra da superfície usinada por AWJ em chapas finas de ágata, medidas no topo da superfície. ....	232
Figura E.14	Gráficos de superfície de resposta para a rugosidade Ra da superfície usinada por AWJ em chapas finas de ágata, medidas no fundo da superfície. ....	233
Figura E.15	Gráficos de contorno para a rugosidade Ra da superfície usinada por AWJ em chapas finas de ágata, medidas no topo da superfície. ....	234

Figura E.16	Gráficos de contorno para a rugosidade Ra da superfície usinada por AWJ em chapas finas de ágata, medidas no fundo da superfície. ....	235
Figura E.17	Gráficos de superfície de resposta para a rugosidade média Ra da superfície usinada por AWJ em chapas grossas de ágata, medidas no topo da superfície. ....	236
Figura E.18	Gráficos de superfície de resposta para a rugosidade média Ra da superfície usinada por AWJ em chapas grossas de ágata, medidas no fundo da superfície. ....	237
Figura E.19	Gráficos de contorno para a rugosidade Ra da superfície usinada por AWJ em chapas grossas de ágata, medidas no topo da superfície. ....	238
Figura E.20	Gráficos de contorno para a rugosidade Ra da superfície usinada por AWJ em chapas grossas de ágata, medidas no fundo da superfície. ....	239

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Níveis de qualidade de superfície. ....	14
Tabela 2.2	Coefficiente de qualidade .....	15
Tabela 2.3	Níveis de qualidade para defeitos de geometria e posição. ....	16
Tabela 2.4	Níveis de qualidade visual ISO/TC 44 N 1770.....	17
Tabela 2.5	Níveis de qualidade ISO 9013:2017. ....	17
Tabela 2.6	Modelos de predição de rugosidade no processo AWJ. ....	19
Tabela 2.7	Estudos relacionados ao processo AWJ em rochas e materiais cerâmicos.....	31
Tabela 3.1	Fator de redução de espessura $\Delta a$ . ....	41
Tabela 3.2	Parâmetros de aquisição de imagens tomográficas.....	42
Tabela 3.3	Fatores e níveis fixos para os experimentos de corte e perfuração. ....	48
Tabela 3.4	Fatores e níveis utilizados no grupo exploratório de experimentos de perfuração. .....	49
Tabela 3.5	Ordem de execução dos experimentos de perfuração na etapa exploratória. ...	49
Tabela 3.6	Fatores e níveis utilizados no grupo detalhado de experimentos de perfuração. .....	50
Tabela 3.7	Ordem de execução dos experimentos de perfuração na etapa detalhada. ....	50
Tabela 3.8	Fatores e níveis projetados para a realização do experimento de corte. ....	52
Tabela 3.9	Ordem de execução dos experimentos de corte. ....	53
Tabela 4.1	Dados coletados sobre o tempo de perfuração – rodada exploratória. ....	57
Tabela 4.2	Análise de variância para o tempo de perfuração do processo AWJ em ágata – etapa exploratória.....	57
Tabela 4.3	Dados coletados sobre o tempo de perfuração – rodada detalhada para perfuração dinâmica.....	58
Tabela 4.4	Análise de variância para o tempo de perfuração do processo AWJ em ágata – etapa detalhada.....	59
Tabela 4.5	Altura percentual da zona suavizada.....	63
Tabela 4.6	Rugosidade $Ra$ na transição entre as zonas suave e ondulada da superfície usinada via AWJ. ....	64
Tabela 4.7	Rugosidade média $Ra$ na área de transição estimada por diferentes operadores em 10 amostras de ágata cortadas via AWJ.....	65

Tabela 4.8	Nível de qualidade de percepção visual $Q_v$ .....	67
Tabela 4.9	Desvio de perpendicularidade $u$ e Largura de fenda $k_w$ medidas no experimento de corte.....	68
Tabela 4.10	Análise de variância do nível de qualidade $Q_v$ no corte com jato abrasivo de chapa de ágata fina com espessura média de 5,3 mm.....	69
Tabela 4.11	Análise de variância do nível de qualidade $Q_v$ no corte com jato abrasivo de chapa de ágata grossa com espessura média de 13,7 mm.....	72
Tabela 4.12	Análise de variância da largura de fenda $k_w$ obtida no corte com jato abrasivo de chapa de ágata fina com espessura média de 5,3 mm.....	74
Tabela 4.13	Análise de variância da largura de fenda $k_w$ obtida no corte com jato abrasivo de chapa de ágata grossa com espessura média de 13,7 mm.....	76
Tabela 4.14	Análise de variância para o desvio de perpendicularidade $u$ medido no corte com jato abrasivo de chapa fina de ágata com espessura média de 5,3 mm. ....	78
Tabela 4.15	Análise de variância para o desvio de perpendicularidade $u$ medido no corte com jato abrasivo de chapa grossa de ágata com espessura média de 13,7 mm.. ....	81
Tabela 4.16	Análise de variância para o rugosidade média $R_a$ medida no corte com jato abrasivo de chapa fina de ágata com espessura média de 5,3 mm. ....	83
Tabela 4.17	Análise de variância para o rugosidade média $R_a$ medida no corte com jato abrasivo de chapa fina de ágata com espessura média de 5,3 mm. ....	85
Tabela 4.18	Limites e códigos de interpolação para modelos de regressão. ....	88
Tabela 4.19	Exemplo de conversão dos valores de engenharia para valores codificados....	88
Tabela 4.20	Resumo do comportamento das variáveis de entrada sobre a qualidade, largura de fenda, desvio de perpendicularidade e rugosidade em chapas finas de ágata usinadas por AWJ. ....	99
Tabela 4.21	Resumo do comportamento das variáveis de entrada sobre a qualidade, largura de fenda, desvio de perpendicularidade e rugosidade em chapas grossas de ágata usinadas por AWJ. ....	100
Tabela A.1	Amostra 01 – Qualidade $Q_v$ 23,54%.....	116
Tabela A.2	Amostra 02 – Qualidade $Q_v$ 48,86%.....	116
Tabela A.3	Amostra 03 – Qualidade $Q_v$ 26,68%.....	117
Tabela A.4	Amostra 04 – Qualidade $Q_v$ 36,72%.....	117
Tabela A.5	Amostra 05 – Qualidade $Q_v$ 44,12%.....	118
Tabela A.6	Amostra 06 – Qualidade $Q_v$ 77,91%.....	118

Tabela A.7	Amostra 07 – Qualidade $Q_v$ 64,63%.....	119
Tabela A.8	Amostra 08 – Qualidade $Q_v$ 93,93%.....	119
Tabela A.9	Amostra 09 – Qualidade $Q_v$ 41,78%.....	120
Tabela A.10	Amostra 10 – Qualidade $Q_v$ 56,98%.....	120
Tabela A.11	Amostra 11 – Qualidade $Q_v$ 33,62%.....	121
Tabela A.12	Amostra 12 – Qualidade $Q_v$ 100%.....	121
Tabela A.13	Amostra 13 – Qualidade $Q_v$ 54,38%.....	122
Tabela A.14	Amostra 14 – Qualidade $Q_v$ 59,81%.....	122
Tabela A.15	Amostra 15 – Qualidade $Q_v$ 50,51%.....	123
Tabela A.16	Amostra 16 – Qualidade $Q_v$ 50,76%.....	123
Tabela A.17	Amostra 17 – Qualidade $Q_v$ 26,97%.....	124
Tabela A.18	Amostra 18 – Qualidade $Q_v$ 58,74%.....	124
Tabela A.19	Amostra 19 – Qualidade $Q_v$ 64,29%.....	125
Tabela A.20	Amostra 20 – Qualidade $Q_v$ 56,76%.....	125
Tabela A.21	Amostra 21 – Qualidade $Q_v$ 60,43%.....	126
Tabela A.22	Amostra 22 – Qualidade $Q_v$ 41,09%.....	127
Tabela A.23	Amostra 23 – Qualidade $Q_v$ 25,39%.....	129
Tabela A.24	Amostra 24 – Qualidade $Q_v$ 29,86%.....	130
Tabela A.25	Amostra 25 – Qualidade $Q_v$ 100%.....	131
Tabela A.26	Amostra 26 – Qualidade $Q_v$ 63,19%.....	132
Tabela A.27	Amostra 27 – Qualidade $Q_v$ 65,13%.....	134
Tabela A.28	Amostra 28 – Qualidade $Q_v$ 60,40%.....	135
Tabela A.29	Amostra 29 – Qualidade $Q_v$ 24,35%.....	136
Tabela A.30	Amostra 30 – Qualidade $Q_v$ 29,59%.....	137
Tabela A.31	Amostra 31 – Qualidade $Q_v$ 26,35%.....	138
Tabela A.32	Amostra 32 – Qualidade $Q_v$ 26,50%.....	140
Tabela A.33	Amostra 33 – Qualidade $Q_v$ 31,04%.....	141
Tabela A.34	Amostra 34 – Qualidade $Q_v$ 44,07%.....	142
Tabela A.35	Amostra 35 – Qualidade $Q_v$ 19,52%.....	144
Tabela A.36	Amostra 36 – Qualidade $Q_v$ 30,18%.....	145
Tabela A.37	Amostra 37 – Qualidade $Q_v$ 11,47%.....	146
Tabela A.38	Amostra 38 – Qualidade $Q_v$ 51,74%.....	147
Tabela A.39	Amostra 39 – Qualidade $Q_v$ 25,17%.....	148

Tabela A.40	Amostra 40 – Qualidade $Q_v$ 31,65%.....	149
Tabela A.41	Amostra 41 – Qualidade $Q_v$ 93,36%.....	151
Tabela A.42	Amostra 42 – Qualidade $Q_v$ 100%.....	151
Tabela A.43	Amostra 43 – Qualidade $Q_v$ 74,92%.....	152
Tabela A.44	Amostra 44 – Qualidade $Q_v$ 64,64%.....	152
Tabela A.45	Amostra 45 – Qualidade $Q_v$ 50,76%.....	153
Tabela A.46	Amostra 46 – Qualidade $Q_v$ 81,46%.....	153
Tabela A.47	Amostra 47 – Qualidade $Q_v$ 77,56%.....	154
Tabela A.48	Amostra 48 – Qualidade $Q_v$ 75,70%.....	154
Tabela A.49	Amostra 49 – Qualidade $Q_v$ 55,41%.....	155
Tabela A.50	Amostra 51 – Qualidade $Q_v$ 100%.....	155
Tabela A.51	Amostra 52 – Qualidade $Q_v$ 91,32%.....	156
Tabela A.52	Amostra 53 – Qualidade $Q_v$ 100%.....	156
Tabela A.53	Amostra 54 – Qualidade $Q_v$ 84,76%.....	157
Tabela A.54	Amostra 55 – Qualidade $Q_v$ 62,86%.....	157
Tabela A.55	Amostra 56 – Qualidade $Q_v$ 50,10%.....	158
Tabela A.56	Amostra 57 – Qualidade $Q_v$ 21,56%.....	158
Tabela A.57	Amostra 58 – Qualidade $Q_v$ 41,22%.....	159
Tabela A.58	Amostra 59 – Qualidade $Q_v$ 47,41%.....	159
Tabela A.59	Amostra 60 – Qualidade $Q_v$ 75,93%.....	160
Tabela A.60	Amostra 61 – Qualidade $Q_v$ 83,54%.....	161
Tabela A.61	Amostra 62 – Qualidade $Q_v$ 66,43%.....	162
Tabela A.62	Amostra 63 – Qualidade $Q_v$ 88,54%.....	164
Tabela A.63	Amostra 64 – Qualidade $Q_v$ 51,84%.....	165
Tabela A.64	Amostra 65 – Qualidade $Q_v$ 74,77%.....	166
Tabela A.65	Amostra 66 – Qualidade $Q_v$ 63,19%.....	167
Tabela A.66	Amostra 67 – Qualidade $Q_v$ 100%.....	169
Tabela A.67	Amostra 68 – Qualidade $Q_v$ 42,50%.....	170
Tabela A.68	Amostra 69 – Qualidade $Q_v$ 64,46%.....	171
Tabela A.69	Amostra 70 – Qualidade $Q_v$ 74,97%.....	173
Tabela A.70	Amostra 71 – Qualidade $Q_v$ 37,90%.....	174
Tabela A.71	Amostra 72 – Qualidade $Q_v$ 61,69%.....	175
Tabela A.72	Amostra 73 – Qualidade $Q_v$ 76,55%.....	177

Tabela A.73	Amostra 74 – Qualidade $Q_v$ 46,08%.....	178
Tabela A.74	Amostra 75 – Qualidade $Q_v$ 60,27%.....	179
Tabela A.75	Amostra 76 – Qualidade $Q_v$ 47,23%.....	181
Tabela A.76	Amostra 77 – Qualidade $Q_v$ 45,54%.....	182
Tabela A.77	Amostra 78 – Qualidade $Q_v$ 63,05%.....	183
Tabela A.78	Amostra 79 – Qualidade $Q_v$ 87,99%.....	185
Tabela A.79	Amostra 80 – Qualidade $Q_v$ 100%.....	187
Tabela B.1	Medições de Rugosidade – Bloco 01.....	189
Tabela B.2	Medições de Rugosidade – Bloco 03.....	189
Tabela B.3	Medições de Rugosidade – Bloco 02.....	190
Tabela B.4	Medições de Rugosidade – Bloco 04.....	191
Tabela F.1	Medições de qualidade visual, largura de fenda e desvio de perpendicularidade – Bloco 01.....	240
Tabela F.2	Medições de qualidade visual, largura de fenda e desvio de perpendicularidade – Bloco 02.....	240
Tabela F.3	Medições de qualidade visual, largura de fenda e desvio de perpendicularidade – Bloco 03.....	241
Tabela F.4	Medições de qualidade visual, largura de fenda e desvio de perpendicularidade – Bloco 04.....	241

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	Coeficiente de redução de espessura – ISO 9013:2017
$d_S$	Distância de afastamento da tubeira
$d_F$	Diâmetro de foco
$d_p$	Dimensão de partícula abrasiva
$h_s$	Profundidade de corte suavizada
$h_e$	Profundidade de corte ondulada
$j$	Defeito de canto
$k_A$	Afunilamento de corte
$k_W$	Largura da fenda do corte
$l_F$	Comprimento do tubo de mistura
$\dot{m}_A$	Vazão de abrasivo (massa)
$\dot{m}_W$	Vazão de água (massa)
$n$	Arrasto de corte
$P$	Pressão da bomba
$Q_v$	Critério de qualidade de percepção visual
$rE$	Raio de canto
$Ra$	Rugosidade média
$Rz$	Média de Rugosidade (de cinco valores de altura máxima)
$Rt$	Profundidade da Rugosidade
$s$	Direção do jato
$t$	Espessura do material de trabalho
$u$	Desvio de perpendicularidade
$t_1$	Defeito de entrada de corte
$t_2$	Defeito de saída de corte
$V_f$	Velocidade de avanço
$\sigma$	Resistência do material a ser usinado
$\gamma$	Peso específico

## 1 INTRODUÇÃO

O material gemológico ágata é uma variedade bandada de calcedônia, que por sua vez é um tipo de quartzo micro a criptocristalino granular e fibroso. A ágata é caracterizada por possuir microporos em sua microestrutura que permite que o seu tingimento via tratamentos químicos e/ou térmicos [Juchem e Brum, 1998]. O estado do Rio Grande do Sul é um dos maiores produtores de ágata, sendo que cerca de 80% deste volume é exportado. As principais jazidas de ágata no estado estão situadas na região da cidade de Salto do Jacuí [Hartmann, 2010].

Quando não é exportada em bruto, a ágata extraída no estado é geralmente transformada em chapas e artefatos de baixa complexidade, como mostra a Figura 1.1. Os principais processos de transformação incluem o serramento, tingimento e lixamento.



Figura 1.1 – Exemplos de produtos comercializados em ágata. Em A), serrados em meio geodo; em B), relógios de mesa; em C), chaveiro.

A diversificação dos produtos fabricados em ágata passa pela melhoria nos processos de fabricação aplicados atualmente. As etapas de corte e polimento ainda utilizam os mesmos equipamentos desde a chegada dos primeiros imigrantes alemães no início do século XX.

O processo de corte por jato de água abrasivo, AWJ (*Abrasive Water Jet*) tem seu uso cada vez mais difundido na fabricação de artefatos de ágata, pois sua flexibilidade permite a obtenção dos mais variados formatos (Figura 1.2). Mesmo assim, ainda existem muitos entraves para a plena utilização e viabilização do processo AWJ no setor produtivo da ágata, onde destacam-se a qualidade final do processamento, bem como o custo associado ao corte.

O processo AWJ, tema de estudo deste trabalho, é uma poderosa ferramenta de corte e recorte. Possui como principais vantagens a capacidade de processar materiais com elevadas espessuras e baixa influência térmica durante a execução do corte [Duarte, et al., 1998]. Em comparação a outros processos não convencionais, o AWJ permite cortar uma maior

diversidade de materiais, como rochas ornamentais, metais, polímeros, compósitos, madeiras, vidros, entre outros [Sommer, 2009].



Figura 1.2 - Exemplos de produtos confeccionados em ágata a utilizando o processo AWJ.

Diversos são os estudos encontrados na literatura que tratam sobre o desenvolvimento de modelos de predição para algumas propriedades do processo AWJ, como espessura de corte, rugosidade, ângulo e largura de fenda em diversos materiais [Hlavác, et al., 2009; Karakurt, et al., 2012; Kovacevic, 1991]. Contudo, são poucos os trabalhos que abordam o processamento de ágata por AWJ [Barp, et al., 2011; Silveira, 2011; Silva, 2013], sendo que nenhum destes aprofunda-se na questão do estudo da influência das variáveis do processo na qualidade do produto final. Estes e outros trabalhos serão abordados de maneira mais aprofundada na revisão da literatura (Capítulo 2).

A literatura mostra diferentes abordagens para a classificação da qualidade do corte oriundo do processo AWJ. Estas baseiam-se na avaliação da rugosidade, largura de fenda, desvio de perpendicularidade e também na comparação visual da superfície usinada com padrões pré-determinados. Contudo, estas abordagens possuem pouca aplicação prática, pois não possuem um parâmetro quantitativo que permita avaliar a presença de estrias ocasionadas pelo jato abrasivo, nem consideram o crescimento das ondulações no perfil da rugosidade ao longo da espessura de corte da peça, como já comprovado em estudos preliminares [Lima, et al., 2016].

## 1.1 Objetivos

Este trabalho tem como ponto focal o desenvolvimento de um critério quantitativo para avaliar a qualidade da superfície cortada em ágata via AWJ com embasamento científico que possa ser aplicado por outros usuários com o objetivo de fácil aplicação prática, bem como na verificação da influência dos diferentes parâmetros de processo para este material e sua

representação através de modelos estatísticos. Desta maneira, será possível determinar as melhores condições de processo para o conjunto material/equipamento, possibilitando obter o corte com um nível de qualidade desejado.

Assim, foi possível estabelecer como objetivo geral deste trabalho desenvolver uma metodologia de avaliação e predição da qualidade da superfície cortada de ágata pelo processo AWJ que possa ser utilizada como base para otimização e planejamento do processo. Para tanto, fazem-se necessários os seguintes objetivos específicos:

- Conhecer detalhadamente o processo AWJ;
- Compreender o efeito dos diferentes parâmetros variáveis de entradas do processo sobre as características do processo e a qualidade resultante na superfície cortada de ágata via AWJ;
- Identificar parâmetros da qualidade do processo AWJ em ágata, principalmente referentes aos parâmetros verticais da rugosidade;
- Formular um método quantitativo para avaliação dos parâmetros de qualidade das superfícies cortadas em ágata por AWJ;
- Desenvolver um método para correlacionar parâmetros de processo com a qualidade do corte por AWJ.

## **1.2 Organização do trabalho**

Para a melhor compreensão, este trabalho foi subdividido em cinco capítulos. Neste primeiro capítulo foram apresentados a contextualização e os objetivos do trabalho. O capítulo 2 apresenta a revisão da literatura relacionada ao trabalho. O capítulo 3 descreve a metodologia proposta para o desenvolvimento do procedimento experimental. No capítulo 4 realiza-se uma discussão dos resultados obtidos durante a execução do trabalho e a metodologia de predição de parâmetros desenvolvida. Por fim, o capítulo 5 apresenta as considerações finais do trabalho.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são descritos os referenciais teóricos utilizados durante a execução do trabalho. Apresentam-se as principais características referente ao material de estudo (ágata), bem como seu processamento convencional. Em seguida, são descritos os fundamentos referentes ao processo AWJ e as definições de qualidade superficial encontrados na literatura. Discutem-se os principais estudos sobre rugosidade, largura de fenda e tempo de perfuração para diversos materiais, e em especial para rochas. Por fim, exploram-se os apontamentos de autores que desenvolveram estudos sobre o processo AWJ em materiais cerâmicos e rochas.

### 2.1 Material de Estudo - Água

O Brasil é atualmente um dos maiores fornecedores mundiais de gemas de cor. Estima-se que o país seja responsável por cerca 1/3 do volume de gemas no mundo, sendo que cerca de 80% deste volume é exportado [IBGM, 2008]. Na Região Sul do país, as gemas mais conhecidas e de maior volume de produção são a água e a ametista, sendo que estado do Rio Grande do Sul é considerado um dos maiores fornecedores destes materiais para o mercado internacional [Juchem, et al., 2009; Juchem, Brum e Ripoll, 2010]. A Figura 2.1 mostra as ocorrências gemológicas na região Sul do Brasil.

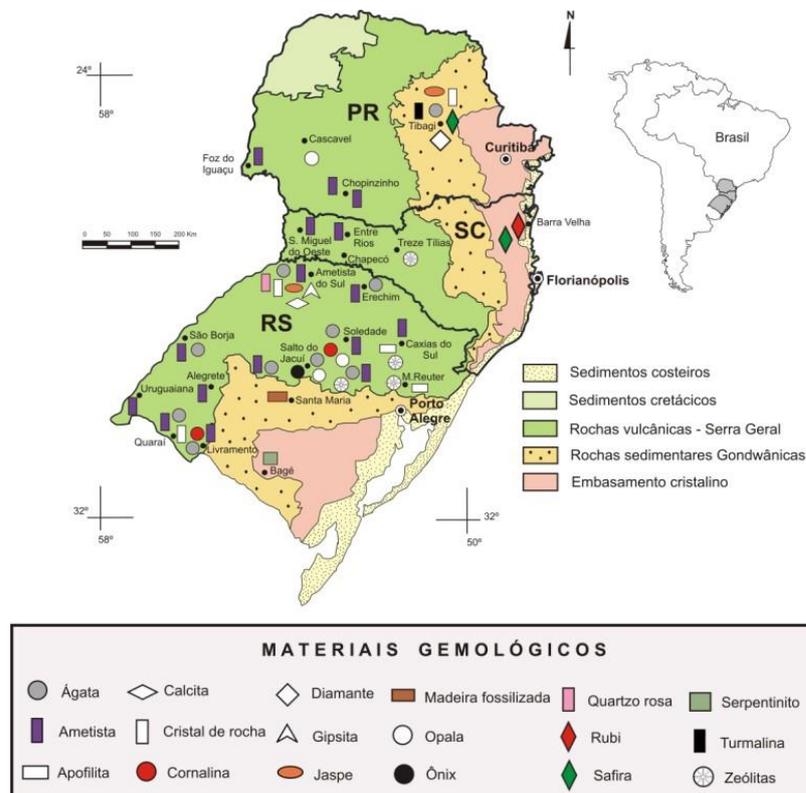


Figura 2.1 - Mapa gemológico da região sul do Brasil. Adaptado de Juchem et al., 2009.

De acordo com Michelin, 2014, a ágata é um dos polimorfos da sílica ( $\text{SiO}_2$ ), caracterizada como uma variedade de calcedônia com bandas distribuídas de forma concêntrica ou paralelas. A ágata umbú, variedade de maior ocorrência na região sul do Brasil, caracteriza-se por sua coloração acinzentada e porosidade de 0,15% a 0,45%, o que possibilita a aplicação de processos termo-químicos de tingimento [Schumann, 2006].

A ágata do Rio Grande do Sul ocorre principalmente no Distrito Mineiro do Salto do Jacuí, associada com opala, calcedônia, quartzo incolor e calcita. A calcedônia é uma variedade micro a criptocristalina de quartzo granular, fibroso e microporoso, onde os microporos podem ter diâmetros de até 0,1  $\mu\text{m}$  e contém água. A ágata ocorre em derrames vulcânicos mineralizados, preenchendo geodos com forma elíptica alongada com tamanho variando entre 10 a 25 cm [Fronde!, 1962 *apud* Michelin, et al., 2014]. A Figura 2.2 mostra algumas formas convencionais em que o material é encontrado no comércio especializado na região de Soledade/RS.



Figura 2.2 - Formas usuais de comercialização da ágata na região sul do Brasil. Em A) na sua forma bruta, geralmente usada para exportação; em B) cortadas em chapa grossa, lixada, sem tingimento, com espessura de aproximadamente 10 a 20 mm; em C) cortada em chapa fina, tingidas, lixadas e polidas, com espessuras de aproximadamente 5 mm. Adaptado de HL Minerais, 2018.

Na indústria gaúcha de pedras preciosas, as grandes empresas dominam o mercado de comercialização e as pequenas empresas se especializam em fabricar certos tipos de produtos para atender as demandas das empresas maiores [Costenaro, 2005]. A maior parte das gemas produzidas no estado do Rio Grande do Sul é exportada em bruto ou recebe pouco beneficiamento [Juchem, et al., 2009]. Ainda, os produtos beneficiados no estado são de baixa complexidade, girando em torno de pedras brutas (geodos, druzas ou cristais), pedras cortadas (serradas<sup>1</sup>) em chapas e outros [Batisti e Tatsch, 2008].

<sup>1</sup> A etapa de corte de pedras preciosas realizada em pequenas empresas utiliza-se de discos de corte com inserção de partículas de diamante, que popularmente são chamados de serras diamantadas. Deste, origina-se os termos “serragem” ou “serramento”, empregado popularmente no chão de fábrica.

Após sua extração, a ágata é classificada em função de sua qualidade, geralmente associada ao seu tamanho, viabilidade de tingimento e presença de regiões de “massa” e “sal” (região preenchida por quartzo macrocristalino). A Figura 2.3 apresenta duas chapas de ágata onde é possível visualizar a diferença entre as regiões de massa e sal.

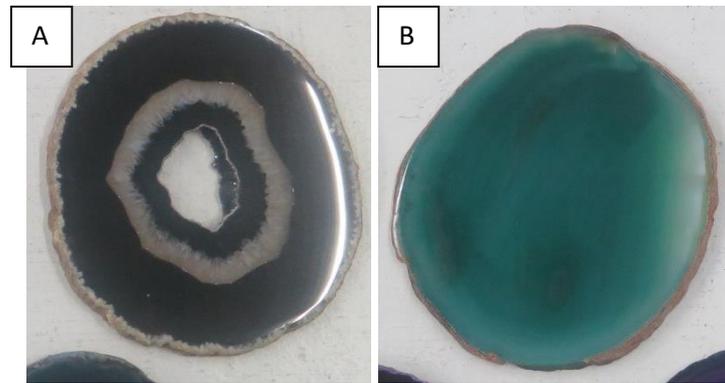


Figura 2.3 - Exemplos de região de massa e de sal em chapas de ágata. Em A) visualiza-se a parte externa em preto formada pelos bandamentos concêntricos e a região central, formada por quartzo macrocristalino; em B), chapa de ágata onde somente visualiza-se região de massa.

### 2.1.1 Extração e beneficiamento de ágata

O beneficiamento de pedras preciosas envolve diversas etapas e subgrupos de serviços. Segundo o IBGM, 2008, a cadeia produtiva de Gemas, Joias e afins compreende desde a extração até a indústria de lapidação e fabricação de artefatos. A exploração geralmente ocorre em garimpos a céu aberto com o auxílio de equipamentos que efetuam o corte do terreno enquanto os garimpeiros fazem a coleta dos geodos aflorados. A Figura 2.4 (A) mostra uma frente de lavra em Salto do Jacuí, onde se pode visualizar como é efetuado o processo de extração.

Os processos de beneficiamento realizados em ágata são geralmente primários, tais como corte, formação e fabricação de artefatos de baixa complexidade. Geralmente, os processos se dividem em três etapas distintas: corte de geodos, tingimento e acabamento [Costenaro, 2005].

A primeira etapa do processo se inicia com a seleção dos geodos que serão beneficiados, os quais são classificados por tamanho e qualidade. Estes são cortados em chapas de espessura que varia de 5 a 20 mm, utilizando-se de máquinas semi-automáticas Figura 2.4 (B). A ferramenta de corte utilizada é um disco diamantado lubrificada a óleo diesel.

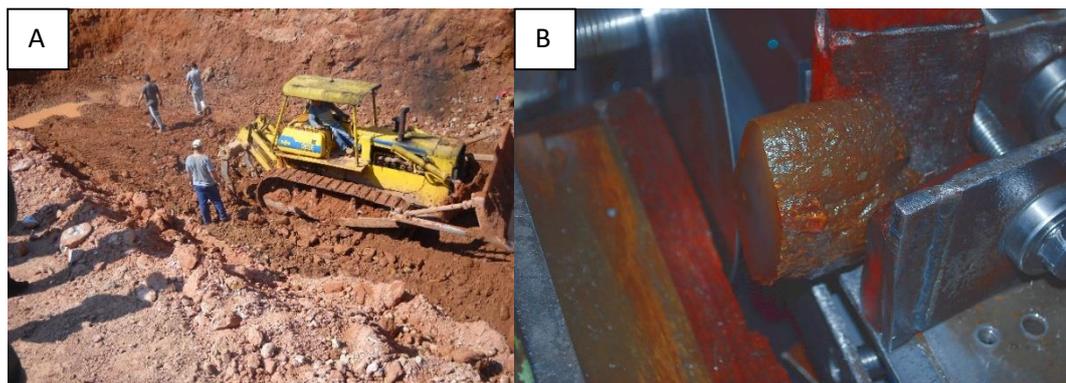


Figura 2.4 – Etapas da cadeia produtiva do beneficiamento da ágata. Em A) Frente de extração de ágata em garimpo na cidade de Salto do Jacuí/RS; em B) detalhe de fixação de uma ágata no equipamento de serrar.

O tratamento termo-químico, popularmente chamado de tingimento, é a segunda etapa do beneficiamento e tem por objetivo ressaltar características ópticas das gemas, adequando às demandas do mercado por meio da pigmentação do material. Cada cor possui um tratamento específico, sendo que as cores mais utilizadas são o azul, verde, vermelho, rosa, roxo e verde. Em geral o processo demora de oito a 20 dias, sendo que o material pode ficar imerso na solução desejada por cerca de 15 dias em alguns casos [Roisenberg e Vilasbôas, 2010]. A Figura 2.5 (A) apresenta recipientes de imersão de ágata para tingimento em pequena empresa de Soledade/RS.



Figura 2.5 - Etapas da cadeia produtiva do beneficiamento da ágata. Em A) tingimento de ágata em pequena empresa de Soledade/RS; em B) processo de lixamento de uma base de ágata.

A terceira e última etapa do processo é o acabamento, que consiste lixar as chapas de ágata. As chapas são prensadas manualmente contra a lixa Figura 2.5 (B), até que se obtenha uma superfície lisa e adequada. O polimento fino é realizado em peças mais finas e delicadas, utilizando-se de rodas expansivas e feltros com o auxílio de abrasivos (trípoli).

## 2.2 Processo de corte a jato de água com abrasivo - AWJ

Segundo Sommer, 2009, o uso moderno do processo de jato de água data de 1968, quando Norman Franz publicou uma patente sobre o desenvolvimento de um sistema de corte a jato de água com alta pressão. Neste processo, a água é pressurizada através de um intensificador, que eleva a pressão entre 140 a 410 MPa e força a sua passagem por um orifício onde o fluxo de água é acelerado de duas a três vezes a velocidade do som. Dados atuais indicam que a pressão da bomba pode chegar até a 650 MPa [Flow water jet, 2016]. De acordo com Momber e Kovacevic, 1998, a tecnologia de corte a jato de água pode ser subdividida de acordo com alguns critérios como a pressão de operação, a continuidade do jato e a presença de abrasivo.

A adição do abrasivo ao fluxo de fluido foi proposta por Saurwein, 1985, da empresa Flow, onde foi possível aumentar a gama de materiais processados pelo processo de jato de água. As principais aplicações do jato de água para uso em processo de fabricação consistem em cortar materiais de difícil usinagem. Adicionalmente, também é possível realizar processos de fresamento, moldagem em 3D, torneamento e furação com o uso de jato de água com abrasivo [Momber e Kovacevic, 1998].

### 2.2.1 Componentes e funcionamento de um processo AWJ

De acordo com Duarte et al., 1998, o AWJ típico consiste de vários componentes, dentre eles a bomba (intensificador de pressão), uma tubulação que leva a água pressurizada até o cabeçote de corte, um alimentador de abrasivo (*abrasive powder feeder*) com tubulação transportadora que leva o abrasivo ao cabeçote. O cabeçote é constituído de um corpo no qual são conectados em uma extremidade a tubulação de água pressurizada e na outra extremidade encontra-se a tubeira fabricada de rubi, safira ou diamante (comumente denominada de gema) com um orifício de saída do jato de água. Diante do orifício de saída do jato de água encontra-se a câmara de mistura conectada a linha de alimentação de abrasivo e o tubo de concentração. O jato de água de alta velocidade, ao passar pela câmara de mistura causa uma diminuição da pressão no interior desta, favorecendo o arraste do abrasivo. O fluxo de abrasivo se mistura ao fluxo de água, reduzindo a velocidade do escoamento na proporção da adição da massa do abrasivo. A Figura 2.6 apresenta o mecanismo básico de funcionamento de um sistema de jato de água e abrasivo.

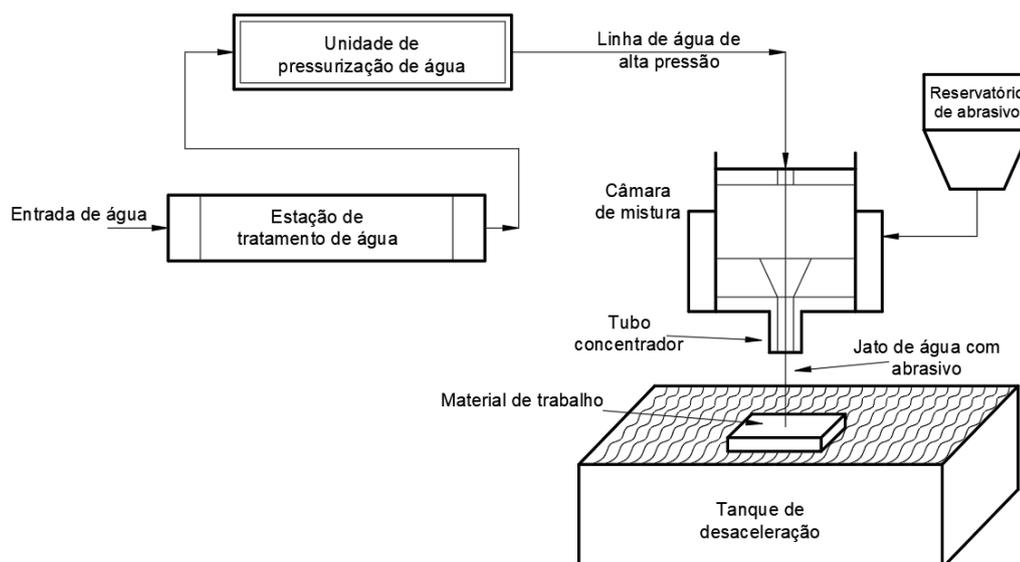


Figura 2.6 - Diagrama básico de funcionamento de um sistema de corte por jato de água e abrasivo. Adaptado de Prasad e Chaytania, 2017.

Inicialmente a água passa por um sistema de filtragem de três estágios, sendo então pressurizada em um intensificador hidráulico de dupla ação. Para obter uma estabilização da pressão pulsada da saída do amplificador alternante de pressão, o fluxo de água passa por um segmento de tubulação de grande diâmetro (em relação a tubulação geral) antes de ser direcionada ao cabeçote de corte. O abrasivo é transportado pela redução da pressão na câmara de mistura em relação à pressão ambiente e assistida por fluxo de ar comprimido ou transportador mecânico do seu reservatório de abrasivo até a câmara de mistura. Nesta, o fluxo de água e o fluxo de abrasivo se misturam. A velocidade do fluxo da mistura se estabelece de acordo com a adição da massa de abrasivo, mantendo-se a quantidade de movimento. A velocidade do fluxo de água acrescido do abrasivo na maioria dos casos ainda se apresenta como uma velocidade supersônica. O fluxo da mistura de água com abrasivo passa através do tubo concentrador em alta velocidade. Na saída do tubo concentrador o fluxo do jato abrasivo apresenta uma divergência pequena e é direcionado para a superfície do objeto à cortar. Um cabeçote típico de jato de água abrasivo é apresentado por diferentes autores [Zhang, Yuqiang e Yanli, 2011; Vundavilli, et al., 2012; Woma GmbH, 2015], Figura 2.7.

No cabeçote, a água passa inicialmente por uma gema com um orifício, confeccionada de rubi, safira ou diamante, com aproximadamente 0,2 mm de diâmetro. O fluxo então é levado ao tubo de mistura onde se adiciona o abrasivo, dando origem ao jato abrasivo. Este jato passa pelo tubo concentrador e é direcionado à superfície onde os grãos abrasivos realizam o trabalho de corte empregando a energia cinética acumulada nos grãos. Os sucessivos grãos que são

lançados contra a superfície exposta do objeto removem parcelas de material desejado, até que este seja totalmente transpassado pelo fluxo de jato abrasivo. A energia residual do jato de água e do abrasivo é absorvida no tanque de desaceleração, onde o rejeito resultante da mistura abrasivo/material erodido decanta e pode ser removido, [Zhang, Yuqiang e Yanli, 2011].

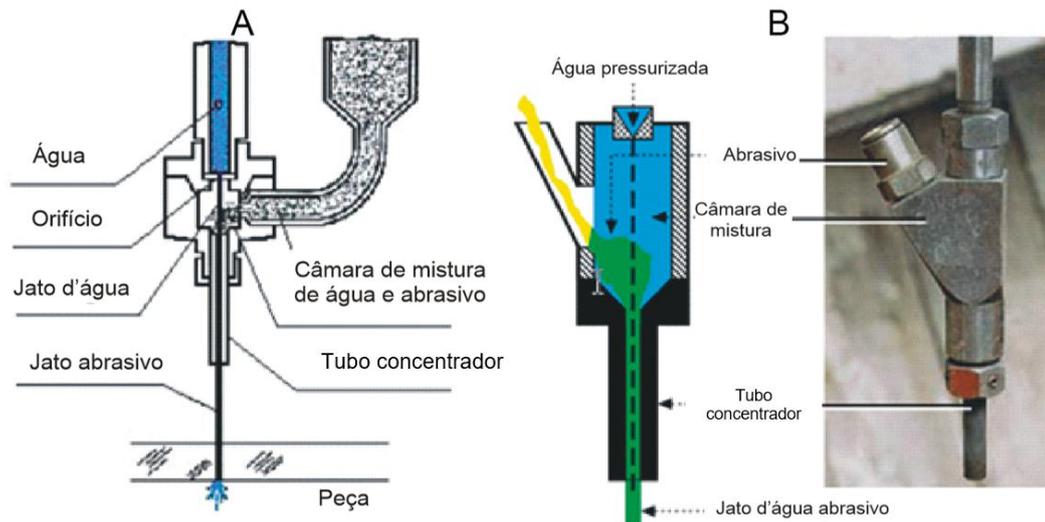


Figura 2.7 - Cabeçote típico de jato de água: Em A) descrito por Zhang et al., 2011; em B) descrito por Woma GmbH, 2015.

Segundo Momber e Kovacevic, 1998, os principais materiais utilizados como abrasivo no processo são os minerais granada, olivina, óxido de alumínio e a areia de sílica. Os autores destacam que a escolha de um material abrasivo para o processo AWJ inclui alguns parâmetros como estrutura, dureza, comportamento mecânico, forma, distribuição e tamanho médio de grão. De acordo com Sommer, 2009, quanto mais duro o abrasivo, mais eficiente é o corte; porém, também maior é o desgaste dos elementos da câmara de mistura e do tubo concentrador do cabeçote.

O corte por AWJ é definido por uma série de parâmetros de entrada que determinam o resultado de trabalho, como a eficiência, a economia e a qualidade do processo como um todo. Desta forma, a investigação da influência desses parâmetros na qualidade obtida nos componentes cortados torna-se requisito fundamental para extrair o máximo possível desta tecnologia. Momber e Kovacevic, 1998 dividem os parâmetros de processo em quatro grupos principais:

- Parâmetros hidráulicos:
  - $P$  – pressão de trabalho;
  - $\dot{m}_W$  – vazão de água (em massa);

- Parâmetros de corte:
  - $V_f$  – velocidade de avanço;
  - $n_p$  – número de passes;
  - $d_S$  - distância de afastamento entre o tubo concentrador e a peça de trabalho, ou distância de afastamento da tubeira<sup>2</sup>.
- Parâmetros de aceleração e mistura;
  - $d_F$  – diâmetro interno da tubeira;
  - $l_F$  – comprimento da tubeira.
- Parâmetros de abrasivo:
  - $\dot{m}_A$  – vazão de abrasivo (em massa);
  - $d_p$  – dimensão da partícula abrasiva;
  - $H_p$  – dureza da partícula abrasiva;
  - Forma da partícula abrasiva.
- Propriedades do material de trabalho:
  - $H_m$  – dureza;
  - Demais propriedades mecânicas;
  - $t$  – espessura;
  - Demais propriedades geométricas.

### 2.3 Especificações geométricas da peça processada por AWJ

Uma das características geométricas de fundamental interesse para o corte de jato abrasivo é a espessura do componente a ser cortado. A espessura pode ser constante ao longo do recorte ou ser variável (dentro de limitações). As dimensões do componente a ser cortado por AWJ são limitadas pela largura da fenda de corte, de forma que tanto a peça bruta, como também o componente recortado tem dimensões mínimas, estabelecidas principalmente pelas características da plataforma de suporte da máquina de AWJ. Os cortes podem ser realizados em linha reta ou em curvas, conforme os recursos oferecidos pelo equipamento. Além disto, a peça pode se apresentar de forma plana ou superfície de forma livre, requerendo ou não a inclinação do cabeçote para realizar o recorte.

As principais grandezas que caracterizam a geometria do corte efetuado processo AWJ, descritas por Momber e Kovacevic, 1998, são a largura da fenda no topo do corte ( $k_{wt}$ ); a

---

<sup>2</sup> Tubeira – tubo concentrador (Figura 2.7)

largura da fenda no fundo de corte ( $k_{wb}$ ); o afunilamento do corte ( $k_A$ ); o desvio de perpendicularidade ( $u$ ); a altura ou espessura de corte suavizada ( $h_s$ ) e a altura ou espessura de corte ondulada ( $h_e$ ). A representação destas grandezas características podem ser observadas, esquematicamente, na Figura 2.8.

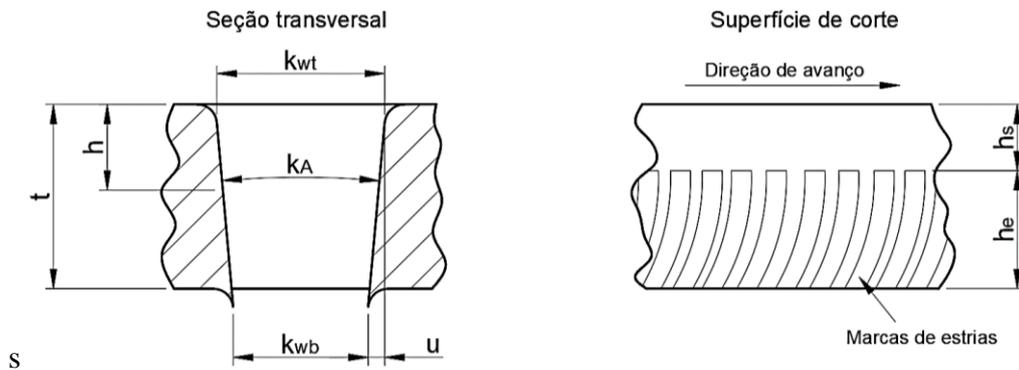


Figura 2.8 – Grandezas características de avaliação do corte por AWJ (Adaptado de Momber e Kovacevic, 1998).

A proposta de norma ISO/WD TC44 1770, 2010 apresenta algumas definições para a determinação das especificações geométricas, dimensionais e tolerâncias para qualidade aplicadas a peças cortadas por jato de água pura e abrasiva de até 300 mm de espessura. A nomenclatura utilizada para definições da fenda (seção transversal da fenda) é apresentada na Figura 2.9.

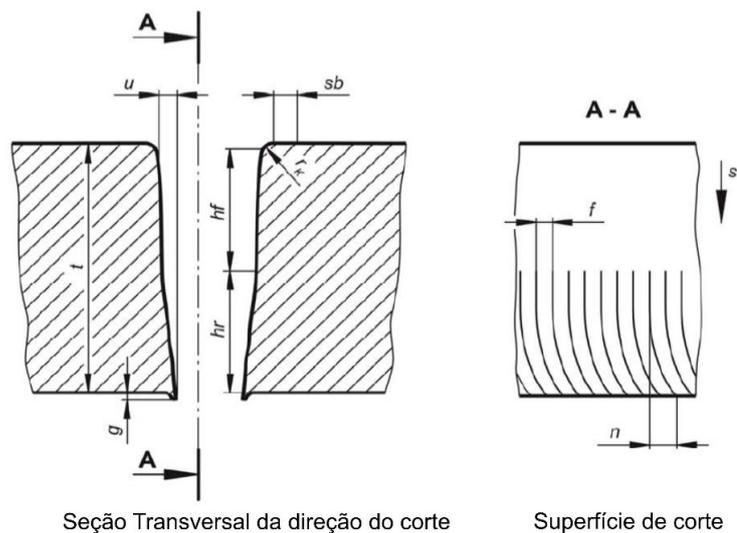


Figura 2.9 – Nomenclatura da geometria da fenda de acordo com a proposta de norma ISO/WD TC44 1770 (Adaptado de ISO 1770, 2010).

No caso,  $g$  representa a rebarba do corte,  $hf$  a altura da região de corte suavizado,  $hr$  a altura da região de corte estriado,  $r_K$  o raio de aresta,  $sb$  o comprimento da zona afetada pelo

jato,  $t$  a espessura da peça,  $u$  a perpendicularidade ou tolerância angular,  $f$  o passo da linha de arrasto (marcas de estrias),  $n$  o arrasto do corte e  $s$  a direção do jato.

A medição da rugosidade, de acordo com este projeto de norma, depende da forma da peça e deve ser realizada nos valores máximos. Para peças com espessura menor que 2 mm, a medição deve ser realizada no meio da superfície, e em peças de maior espessura, a medição deve ser realizada a 10% da espessura na parte de baixo da peça, considerando que a distância mínima da parte inferior é de 1 mm. A própria norma informa que alguns valores, em especial os de espessura, podem variar de acordo com o material de trabalho [ISO 1770, 2010].

## 2.4 Qualidade da superfície de corte por AWJ

Conforme Kolahan e Khajavi, 2010, as principais medidas de qualidade da superfície cortada por AWJ são a rugosidade e a largura da fenda, que variam de acordo com a espessura do componente. A regularidade do corte é avaliada pelo desvio de perpendicularidade ( $u$ ), caracterizado pela distância entre duas linhas paralelas tangentes no qual o perfil transversal do corte está inscrito, como mostrado na Figura 2.10 (A) [ISO 9013, 2017]. Outros desvios de forma que caracterizam os componentes cortados por AWJ são relacionados a trajetória de corte e consistem no defeito de canto  $j$  e o raio de canto  $r_E$  (Figura 2.10 (B)), defeitos de entrada e saída de corte  $t_1/t_2$  (Figura 2.10 (C)) e as linhas de arrasto (Figura 2.10 (D)) [ISO 1770, 2010].

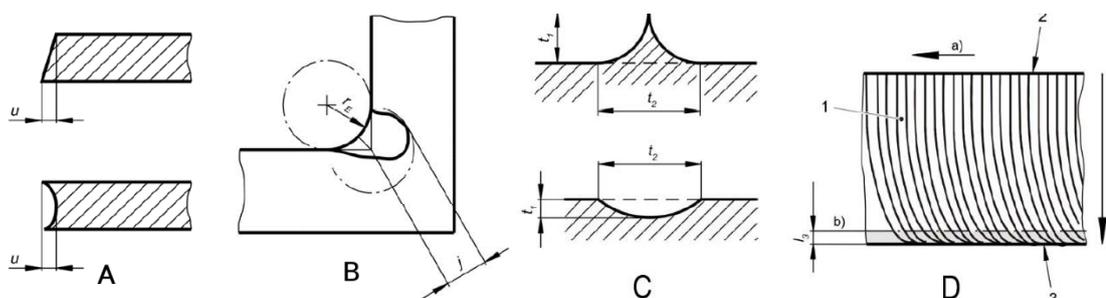


Figura 2.10 – Características do corte a jato de água e abrasivo, em A) perpendicularidade; em B) defeito de canto; em C) defeito de início e fim de corte; em D) região estriada (Adaptado de ISO 1770, 2010).

O defeito de canto é um defeito de trajetória ocasionado pela mudança de direção brusca da linha de corte durante a realização de corte. Este defeito é mais pronunciado na região inferior do corte por AWJ. Os defeitos de entrada e saída com as larguras  $t_1/t_2$  são ocasionados pelos desvios entre as linhas de aproximação e afastamento durante a realização do corte [ISO 1770, 2010].

### 2.4.1 Modelos descritivos de qualidade de corte por AWJ

Diferentes abordagens definem a qualidade do corte por AWJ, sendo algumas mais qualitativas [Zeng e Kim, 1993] e outras mais quantitativas [Hlávác, 2009; ISO 1770, 2010], sendo estas descritas nos parágrafos a seguir.

Zeng e Kim, 1993 apresentaram um modelo empírico capaz de prever a velocidade de avanço em determinadas profundidades de corte para diferentes materiais, associando a este um nível de qualidade  $Q$ . De acordo com os autores, este modelo pode ser usado para uma grande variedade de materiais de engenharia, desde que seja conhecido o seu número de usinabilidade  $N_m$ . Este parâmetro pode ser obtido experimentalmente através de quatro diferentes técnicas descritas pelos autores em outro trabalho [Zeng, 2007]. O valor de  $Q$  pode ser escolhido entre 1 e 5, dependendo do nível de qualidade desejado para o processo. A descrição dos níveis de qualidade pode ser visualizada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Níveis de qualidade de superfície (Adaptado de Zeng e Kim, 1993).

Nível de qualidade	Descrição
Q=1	Critério de corte de separação
Q=2	Superfície estriada sobre a metade inferior da superfície
Q=3	Transição entre superfície ondulada e suave, marcas suaves de estrias podem aparecer
Q=4	Sem estrias para a maioria dos materiais de engenharia
Q=5	Acabamento muito suavizado

Outro modelo de predição de parâmetros que engloba a qualidade foi descrito por Hlávác, 2009. Em seu trabalho, o autor afirma que o perfil de estrias padrão formado pelo processo AWJ possui uma inclinação crescente com cinco zonas distintas ao longo da espessura de corte, como apresentado na Figura 2.11.

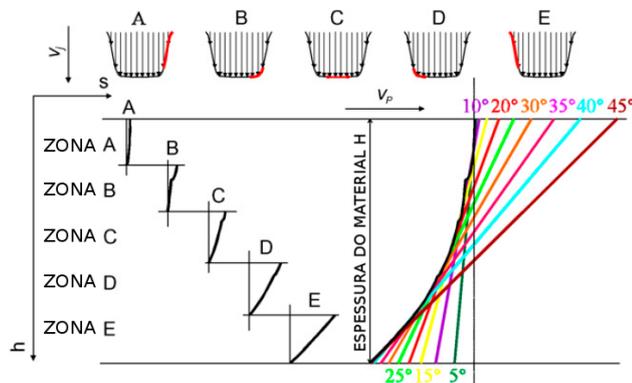


Figura 2.11 - Evolução da forma da fenda no processo AWJ (Adaptado de Hlávác, 2009).

A partir de suas observações, Hlávac, 2009 desenvolveu um modelo empírico que permite calcular, para uma determinada espessura de material, a velocidade de avanço para a separação total de material, ou ainda permite determinar a espessura de material que pode ser usinada a uma velocidade de avanço definida. De acordo com o autor, suas equações permitem chegar a um valor de velocidade de corte ou espessura em que seja possível realizar o corte completamente, sem considerar o acabamento da superfície usinada. Para efeitos de qualidade, o autor introduz o coeficiente auxiliar de qualidade  $C_Q$ , onde considera cinco zonas de qualidade da superfície através da espessura de corte (associado à Figura 2.11), nomeadas de A até E. Assim, para determinar a velocidade de avanço necessária para a realização do corte com a qualidade desejada, basta multiplicar o valor obtido através das equações modeladas pelo coeficiente auxiliar de qualidade  $C_Q$ .

Em outro trabalho, Hlávac et al., 2009 apresentaram um estudo complementar sobre a qualidade da superfície usinada por AWJ através de um estudo experimental com 144 amostras de diferentes materiais (cobre, granito, mármore e outros). A qualidade foi quantificada pela medição do ângulo de declinação resultante do corte. Os níveis de qualidade apresentados por Hlávac em suas publicações são apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Coeficiente de qualidade (Adaptado de Hlávac, 2009; Hlávac et al., 2009).

Nível de Qualidade	Profundidade		$C_Q$		Rugosidade $R_a$
	A <sup>1</sup>	B <sup>2</sup>	A <sup>1</sup>	B <sup>2</sup>	
Zona A	15% $t_s$	10% $t_s$	0,1	0,1	$\leq 6,3 \mu\text{m}$
Zona B	40% $t_s$	30% $t_s$	0,3	0,3	$\leq 6,3 \mu\text{m}$
Zona C	60% $t_s$	50% $t_s$	0,5	0,5	$\leq 6,3 \mu\text{m}$
Zona D	80% $t_s$	75% $t_s$	0,7	0,75	Não informado
Zona E	100% $t_s$	100% $t_s$	0,9	0,9	Não informado

A<sup>1</sup> - Publicado em Hlávac, 2009. B<sup>2</sup> - Publicado em Hlávac et al., 2009.

A definição das zonas de qualidade descritas por Hlávac, 2009 e em Hlávac et al., 2009 se contrapõem na definição da profundidade limite de cada zona e também no coeficiente de qualidade. Os autores apresentam uma relação entre as zonas de qualidade e a rugosidade média  $R_a$  da superfície; porém, não fazem nenhuma menção a como este valor foi determinado (posição e direção de medição, por exemplo).

A qualidade da superfície usinada por AWJ foi abordada através da proposta de norma ISO/WD TC44 1770, 2010. As características de qualidade são definidas por rugosidade, perpendicularidade, desvio de canto e defeitos de início e fim de corte, mostrados na Tabela 2.3. Para efetuar a classificação, a norma recomenda realizar uma comparação visual entre a superfície usinada e os padrões referenciais apresentados na Tabela 2.4, especialmente quando a superfície de corte deva atender a requisitos decorativos especiais.

Tabela 2.3 - Níveis de qualidade para defeitos de geometria e posição (Adaptado de ISO, 2010).

Nível	Rugosidade $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Desvio de ângulo $u$ (mm)	Desvio de canto $j$ (mm)	Desvio de início e fim $t_1/t_2$ (mm)	Espessura máxima (mm)
$Q5$	3,2	< 0,05	< 0,25	< 0,1	0 a 20
$Q4$	6,3	< 0,10	< 0,7	< 0,25	0 a 30
$Q3$	12,5	< 0,20	< 1,5	< 0,5	0 a 40
$Q2$	25	< 0,30	< 3,0	< 1,0	0 a 50
$Q1$	50	> 0,30	> 3,0	> 1,0	0 a 300

Segundo Perc et al., 2015 a determinação da qualidade no processo AWJ é muito subjetiva na prática. Em seu estudo, os autores desenvolveram um método de avaliação através da análise fractal, onde os padrões de referência da qualidade (Tabela 2.4) foram fotografados e utilizados para determinar espectros e dimensões fractais de cada nível de qualidade. Os autores afirmam ser possível efetuar a comparação de qualquer superfície usinada com o padrão de referência para sua classificação, através da determinação de seu espectro e dimensão fractal, mas ressaltam que a qualidade da imagem obtida (contraste, resolução, balanço de cores) pode interferir no resultado.

A norma ISO 9013, 2017 apresenta uma forma de classificação de qualidade e especificações geométricas para cortes realizados por processos térmicos. A geometria da superfície resultante em processos térmicos é semelhante à encontrada nos cortes por AWJ, com a presença de desvios de perpendicularidade e regiões lisa e estriada. Assim, a norma estabelece que a qualidade da superfície é definida pelo desvio de perpendicularidade ( $u$ ) e pela rugosidade de altura máxima ( $R_z$ ), sendo classificada em um intervalo de 1 a 5 conforme os critérios apresentados na Tabela 2.5.

O termo  $a$  no Tabela 2.5 refere-se a redução da espessura, a qual deve ser aplicada no início e no fim do perfil transversal do corte para evitar o efeito causado pelo arredondamento na parte inicial do corte e pela presença de rebarbas na parte final do corte.

Tabela 2.4 - Níveis de qualidade visual ISO/TC 44 N 1770 (Adaptado de ISO, 2010).

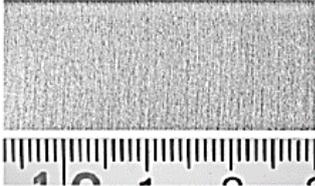
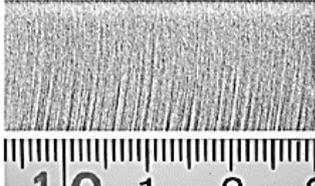
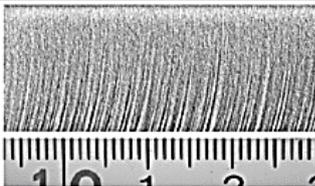
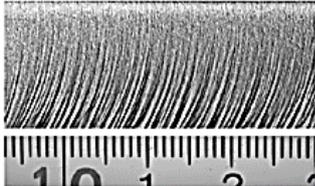
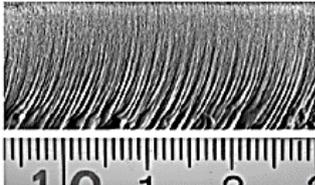
Nível Q	Descrição	Imagem
Q5	Este nível de qualidade fornece a mais alta precisão da peça e a menor rugosidade. Q5 requer uma velocidade de corte muito baixa. Não há sulcos visíveis.	
Q4	Este nível de qualidade apresenta alta precisão da peça e rugosidade da superfície discreta. Alguns sulcos de ranhuras estão visíveis.	
Q3	Resultado comum, selecionada por razões econômicas. Boa qualidade usando velocidades de corte eficientes. As ranhuras são facilmente visíveis.	
Q2	Corte brusco, com ranhuras claras, mas regulares, sem apresentar arrancamento.	
Q1	A peça de trabalho foi cortado na velocidade máxima. A superfície de corte apresenta defeitos claros (ranhuras grosseiras, arrancamento, cortes interrompidos, etc.)	

Tabela 2.5 - Níveis de qualidade ISO 9013:2017 (Adaptado de ISO 9013, 2017).

Intervalo	Desvio de perpendicularidade $u$ (mm)	Rugosidade de altura máxima $R_z$ (mm)
1	0,05 + 0,003 <i>a</i>	0,010 + 0,6 <i>a</i>
2	0,15 + 0,007 <i>a</i>	0,040 + 0,8 <i>a</i>
3	0,4 + 0,01 <i>a</i>	0,070 + 1,2 <i>a</i>
4	0,8 + 0,02 <i>a</i>	0,110 + 1,8 <i>a</i>
5	1,2 + 0,035 <i>a</i>	

Zeng e Kim, 1993 apresentam um critério de qualidade subjetivo e de difícil aplicação prática, pois não estabelece parâmetros mensuráveis de separação entre diferentes níveis de qualidade. Já a abordagem apresentada por Hlávác considera que a proporção de profundidade entre cada uma das cinco zonas é fixa [Hlávác, et al., 2009; Hlávác, 2009]. A aplicação deste critério é simples; contudo, torna-se impraticável em virtude da grande quantidade de coeficientes de correção e dados empíricos referentes a material, abrasivo e equipamento (coeficiente de atenuação do jato, de perda de velocidade, de mudança da performance do jato, por exemplo). Já o projeto de norma ISO TC 44/1077 tenta abordar a qualidade de forma mais

completa, inserindo uma maior quantidade de parâmetros a serem observados, sem porém definir um critério claro para sua aplicação. Contudo, não foi encontrada nenhuma referência a esta norma na base de dados ISO atual<sup>3</sup>, nem como projeto de norma, nem como parecer sobre a mesma, sendo que a sua aplicação somente é mencionada na publicação de Perek et al., 2015. Já a norma ISO 9013:2017 possui um critério de avaliação da qualidade mais claro e bem definido; contudo, somente possui campo de validade para cortes produzidos por processos térmicos (*laser*, plasma e oxiacetilênico).

Nesse sentido, verificou-se que não há um consenso dos pesquisadores em relação à maneira de efetuar a classificação da qualidade na superfície usinada por AWJ, sendo esta uma lacuna que carece de maiores estudos. Poucos são os trabalhos que abordam o tema e tentam englobar os diferentes defeitos para classificar a qualidade, sendo que em sua maioria o fazem através de avaliações de características isoladas, como rugosidade. Neste sentido, faz-se necessário o desenvolvimento de um critério objetivo que possa englobar os pontos positivos de cada abordagem e que possibilite padronizar a classificação da qualidade da superfície usinada por AWJ.

## **2.5 Avaliação da rugosidade no processo AWJ**

Uma das formas mais utilizadas para avaliar a qualidade do corte produzido por AWJ consiste em medir a rugosidade da superfície de corte. Alguns autores elaboraram equações empíricas de predição da rugosidade e outros apresentam resultados de investigativos da influência causado pela variação nos parâmetros variáveis de entrada de processo sobre a rugosidade. As principais equações empíricas de predição de rugosidade encontrados na literatura estão apresentados na Tabela 2.6.

---

<sup>3</sup> Busca realizada em 19/09/2016

Tabela 2.6 - Modelos de predição de rugosidade no processo AWJ.

Eq.	Modelo	Fonte
(2.1)	$R_a = a_1 t^{a_2} V_f^{a_3}$	Curham, Reuber e Kim, 1989
(2.2)	$R_a = b_1 + b_2 t + b_3 t^2$	Burnham e Kim, 1989
(2.3)	$R_a = c_1 + c_2 t + c_3 V_f + c_4 t^2 + c_5 V_f^2 + c_6 V_f t$	Burnham e Kim, 1989
(2.4)	$R_a = c_1 (V_f d_p)^{c_2} (\dot{m}_A P)^{c_3}$	Webb e Rajukar, 1990
(2.5)	$R_a = C_0 + \sum_{i=1}^n C_i X_i + \sum_{i=1}^n C_{ii} X_{ii}^2 + \sum_{i=1}^n C_{ij} X_i X_j$	Kovacevic, 1991
(2.6)	$R_a = a V_f + b$	Zhang, Yuqiang e Yanli, 2011
(2.7)	$R_a = R_{aj} \left[ \sqrt{\frac{V_f \dot{m}_A P d_f}{V_{f_{opt}} \dot{m}_{A_{opt}} P_{opt} d_{f_{opt}}}} \right] \left[ e^{\ln(\sqrt{(\log h_m)^2 + \sqrt{(\log 1/Y_{ret})^2 + Ra_{rad}^2}})} \right]$	Hloch e Valíček, 2012

Nas equações apresentadas na Tabela 2.6, definem-se os seguintes parâmetros:

- $R_a$  - rugosidade média;
- $t$  - espessura da peça a ser cortada;
- $V_f$  - velocidade de avanço;
- $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, C_0, C_i, C_{ii}$  e  $C_{ij}$  - constantes de regressão;
- $d_p$  - dimensão da partícula abrasiva;
- $P$  - pressão da bomba;
- $\dot{m}_A$  - fluxo mássico de abrasivo;
- $X_i, X_{ii}, X_j$  - parâmetros de processo investigados.
- $V_{f_{opt}}$  - velocidade de avanço ótima;
- $\dot{m}_{opt}$  - vazão mássica de abrasivo ótima;
- $P_{opt}$  - pressão ótima;
- $d_f$  - diâmetro de foco;
- $d_{f_{opt}}$  - diâmetro de foco ótimo;
- $h_m$  - altura de medição;

- $R_{aj}$  - rugosidade unitária;
- $R_{a\ rad}$  - rugosidade no plano radial;
- $Y_{ret}$  - retardo da linha de corte.

A Tabela 2.6 mostra que os modelos mais simples (Equações 2.1 e 2.2 levam em consideração apenas a velocidade de avanço e a profundidade do material. Outros modelos com maior grau de refinamento incluem uma maior quantidade de parâmetros (Equações 2.3 e 2.4), como a vazão de abrasivo, pressão e diâmetro de partícula. O modelo de Kovacevic, 1991 (Equação 2.5) é o mais generalizado de todos os modelos encontrados, pois permite utilizar qualquer combinação de parâmetros através da aplicação de uma regressão multivariada de segunda ordem. Outros autores levam em consideração uma grande quantidade de constantes empíricas e específicas de cada material, como no caso dos modelos de Hloch e Valíček, 2012 (Equação 2.7) e Zhang et al., 2011 (Equação 2.6), que consideram a rugosidade como sendo uma função da velocidade de avanço, sendo esta influenciada por todos os outros parâmetros incluindo o número de usinabilidade  $N_m$  [Zeng e Kim, 1993].

Os modelos apresentados na Tabela 2.6 são de uso geral e podem ser utilizados em diferentes materiais. Contudo, observa-se que os modelos se comportam de maneira diferente perante a alteração de materiais e combinação de parâmetros. A Figura 2.12 apresenta um resumo dos principais estudos referentes à investigação da influência dos parâmetros de processo na qualidade, sendo que os pontos de maior interesse de cada trabalho são descritos a seguir.

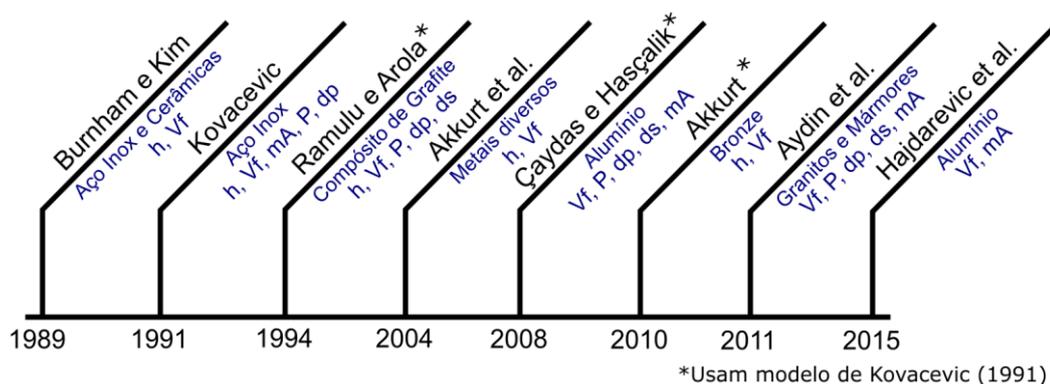


Figura 2.12 - Estudos encontrados na literatura relacionados a rugosidade no processo AWJ.

Kovacevic, 1991 desenvolveu sua teoria de predição da rugosidade a partir de experimentos realizados com aço inoxidável 304. O modelo de ajuste utilizado é apresentado na Equação 2.8.

$$\begin{aligned}
 R_a = & 305,96 - 56,54V_f - 81,55\dot{m}_A + 0,62P - 11,98h - 0,82d_p + 4,79V_f^2 \\
 & - 0,34 V_f \dot{m}_A - 0,15P V_f + 1,56P \dot{m}_A + 208,5h V_f - 93h \dot{m}_A \\
 & - 12,75h P + 550,56h^2 + 0,12d_p V_f + 0,22d_p \dot{m}_A - 0,01d_p P \\
 & + 1,96d_p h
 \end{aligned} \quad (2.8)$$

Onde  $V_f$  é a velocidade de avanço [pol/min],  $\dot{m}_A$  é a vazão mássica de abrasivo [lb/min],  $P$  é a pressão de água [kPsi],  $h$  é a altura medida ao longo da espessura [pol],  $d_p$  é o tamanho médio da partícula abrasiva [mesh]. O comportamento do modelo quanto a variação nos parâmetros de estudo é mostrado nas Figura 2.13 e Figura 2.14.

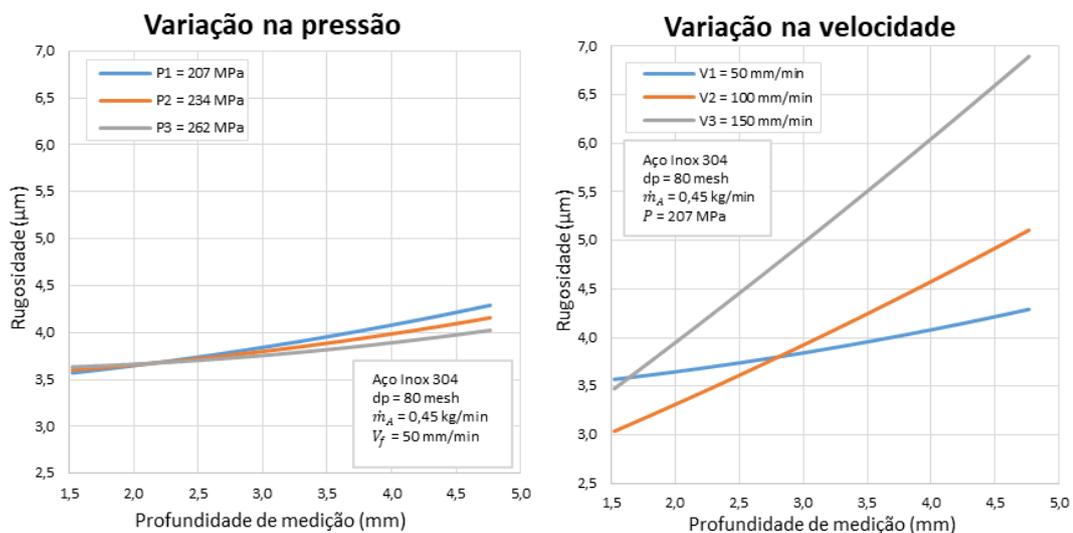


Figura 2.13 - Comportamento da rugosidade como função da variação da espessura para a variação da velocidade de avanço e pressão de corte empregando o modelo de Kovacevic, 1991.

Nas Figura 2.13 e Figura 2.14 é possível verificar uma tendência de aumento na rugosidade ao longo da espessura de corte para todos os parâmetros observados. Nestes gráficos, as unidades foram convertidas para o sistema internacional após a aplicação do modelo. O gráfico apresentado na Figura 2.13, mostra que a elevação da pressão tende a gerar uma redução na rugosidade para profundidades de corte maiores do que 2,5 mm. Também se verifica a tendência de que velocidades de avanço menores sejam capazes de gerar uma superfície de melhor qualidade.

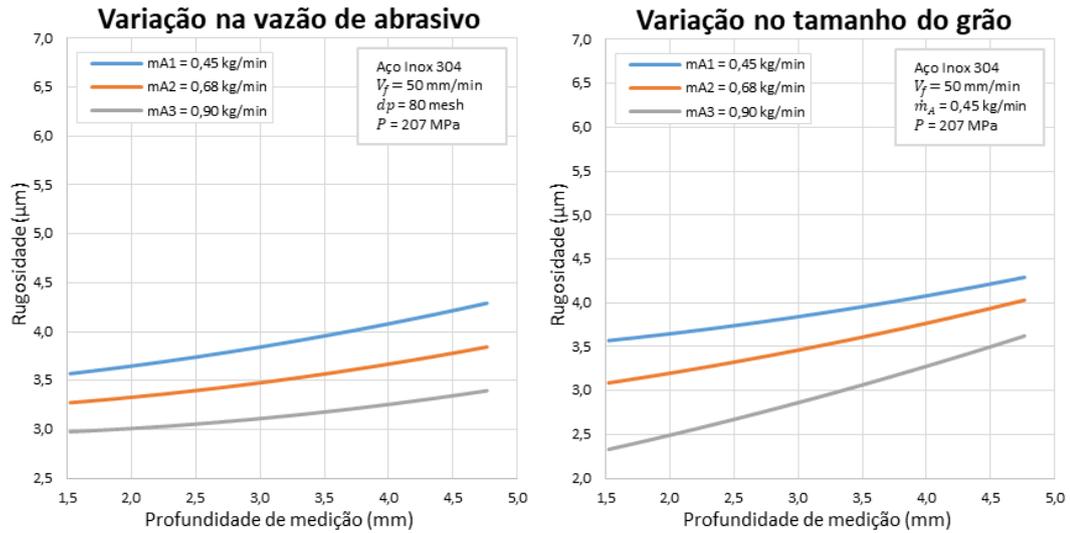


Figura 2.14 - Comportamento da rugosidade como função da espessura de corte para a variação do tamanho do grão abrasivo e da vazão mássica de abrasivo empregando o modelo de do modelo de Kovacevic, 1991.

A Figura 2.14 mostra que, quanto menor tamanho médio da partícula abrasiva (maior tamanho de malha mesh), menor será a rugosidade, bem como o aumento na vazão mássica do grão abrasivo também causa redução na rugosidade.

Ramulu e Arola, 1994 apresentam um estudo de corte via AWJ executado em compósito laminado de grafite/epóxi, através de três rodadas de experimentos de corte. Uma equação para a predição da rugosidade foi gerada a partir de um modelo de regressão polinomial de segunda ordem (o mesmo usado por Kovacevic, 1991), de acordo com a Equação 2.9.

$$\begin{aligned}
 R_a = & 1 - 0,0080P + 0,1476d_p - 3,0241V_f - 1,0704d_s - 0,9781h \\
 & + 0,0001P^2 - 0,0015d_p^2 - 0,28V_f^2 + 0,8398d_s^2 + 0,0626h^2 \\
 & - 0,0002P d_p + 0,0002P V_f - 0,0010P d_s - 0,0040P h \\
 & + 0,0664d_p V_f + 0,0074d_p d_s + 0,0119d_p h - 1,0550V_f d_s \\
 & + 0,1190V_f h - 0,0818d_s h
 \end{aligned} \quad (2.9)$$

Onde  $P$  é a pressão [MPa],  $d_p$  é o tamanho da partícula abrasiva [mesh],  $V_f$  é a velocidade de avanço [mm/s],  $d_s$  é a distância de afastamento da tubeira [mm],  $h$  é a altura de medição ao longo da espessura da peça [mm]. O comportamento da rugosidade calculada pelo modelo apresentado por Ramulu e Arola, 1994 é mostrado na Figura 2.15 e Figura 2.16.

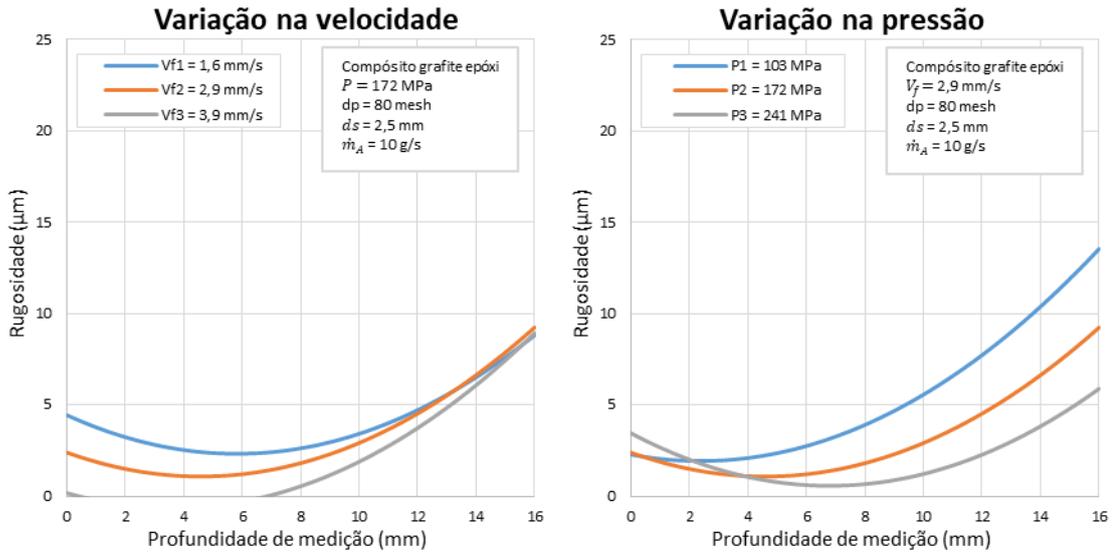


Figura 2.15 - Comportamento da rugosidade como função da espessura do componente para diversas velocidades de corte e pressões da água empregando o modelo de Ramulu e Arola, 1994.

A Figura 2.15 ilustra que a rugosidade tende inicialmente a reduzir (da zona inicial de dano para a zona suavizada) e até um valor mínimo e logo após tende a aumentar (ao entrar na zona ondulada da superfície). Ainda, as velocidades de avanço e a pressão maiores tendem a produzir menores rugosidades.

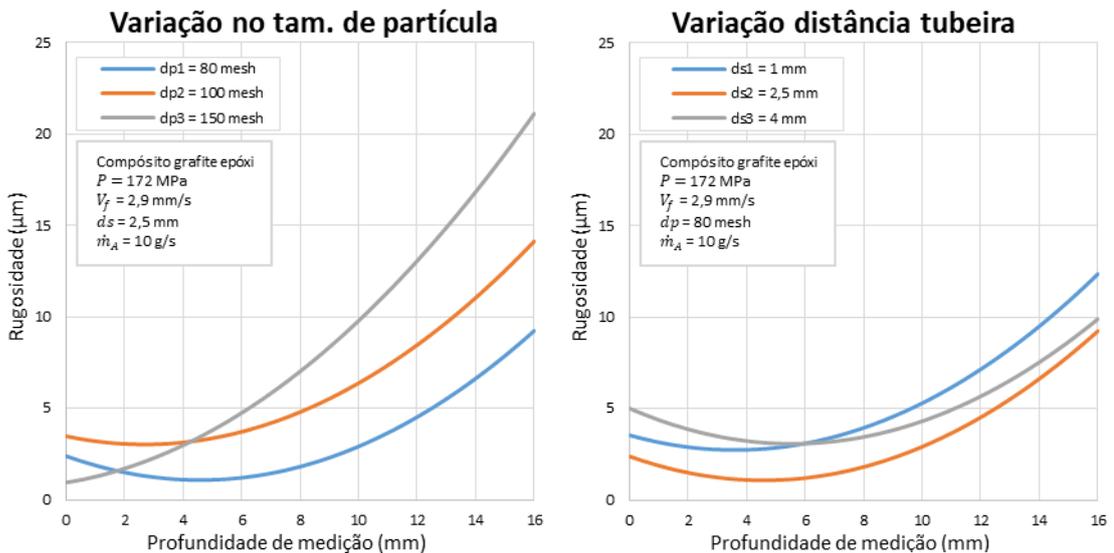


Figura 2.16 - Comportamento da rugosidade como função da espessura do componente para diferentes tamanhos de partículas e distâncias de afastamento da tubeira empregando o modelo do modelo de Ramulu e Arola, 1994.

Os gráficos apresentados na Figura 2.16 indicam que partículas de tamanhos maiores e maiores distâncias de afastamento da tubeira produzem uma menor rugosidade. A rugosidade

primeiro reduz até um valor mínimo e depois cresce ao longo da profundidade da peça (medida a partir da superfície superior), indicando um comportamento diferente do modelo proposto por Kovacevic, 1991 (Figura 2.13 e Figura 2.14), mesmo utilizando como base o mesmo modelo de regressão.

O efeito da velocidade de avanço na rugosidade da superfície usinada via AWJ também foi abordado no trabalho de Akkurt et al., 2004, no qual os autores desenvolveram um estudo para cinco diferentes materiais: alumínio comercial puro, liga de alumínio Al-6061, bronze 353, aço AISI 1030 e aço inox AISI 304. Os resultados apresentados indicam que nem sempre a redução da velocidade de avanço causa uma melhoria significativa na rugosidade final, indicando que cada material se comporta de maneira diferente sob a variação dos parâmetros de processo.

Çaydas e Hasçalık, 2008 apresentaram um estudo comparativo de parâmetros para predição da rugosidade. Os autores não levaram em consideração a profundidade da peça usinada, sendo que as medições de rugosidade foram efetuadas a 5 mm da superfície de entrada do jato em todas as amostras. O modelo de regressão utilizado é apresentado na Equação 2.10.

$$\begin{aligned}
 R_a = & -5,07976 + 0,08169V_f + 0,07912P - 0,34221d_s - 0,08661d_p \\
 & - 0,34866\dot{m}_A - 0,00031V_f^2 - 0,00012P^2 + 0,10575d_s^2 \\
 & + 0,00041d_p^2 + 0,07590\dot{m}_A^2 - 0,00008V_f \dot{m}_A \\
 & - 0,00009P \dot{m}_A + 0,03089d_s \dot{m}_A + 0,00513d_p \dot{m}_A
 \end{aligned} \quad (2.10)$$

Onde  $V_f$  é a velocidade de avanço [mm/min],  $P$  é a pressão da água [MPa],  $d_s$  é a distância de afastamento da tubeira [mm],  $d_p$  é o diâmetro médio de partícula [m],  $\dot{m}_A$  é a vazão mássica de abrasivo [g/s]. O comportamento do modelo pode ser observado na Figura 2.17 e na Figura 2.18.

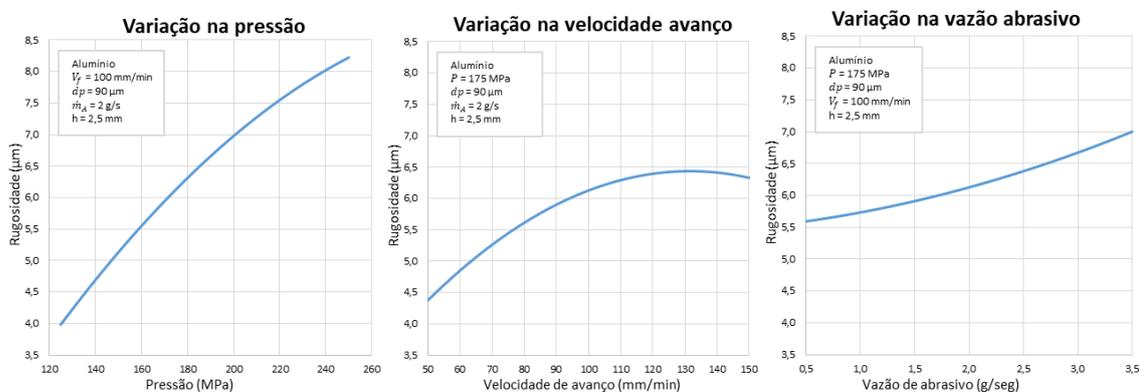


Figura 2.17 - Comportamento da rugosidade como função da variação na pressão, velocidade de avanço e vazão de abrasivo, empregando o modelo de regressão de Çaydas e Hasçalık, 2008.

Os gráficos da Figura 2.17 mostram que o aumento na pressão de trabalho e na vazão de abrasivo causam um aumento na rugosidade. O efeito mais pronunciado é observado na pressão de trabalho, onde se observa uma maior variação na rugosidade (de 4  $\mu\text{m}$  até aproximadamente 8  $\mu\text{m}$ ). O aumento da velocidade de avanço causa uma elevação da rugosidade até um pico máximo e logo após a sua redução, o que não é esperado, uma vez que maiores velocidades de avanço tendem a ter um acabamento de menor qualidade da superfície cortada.

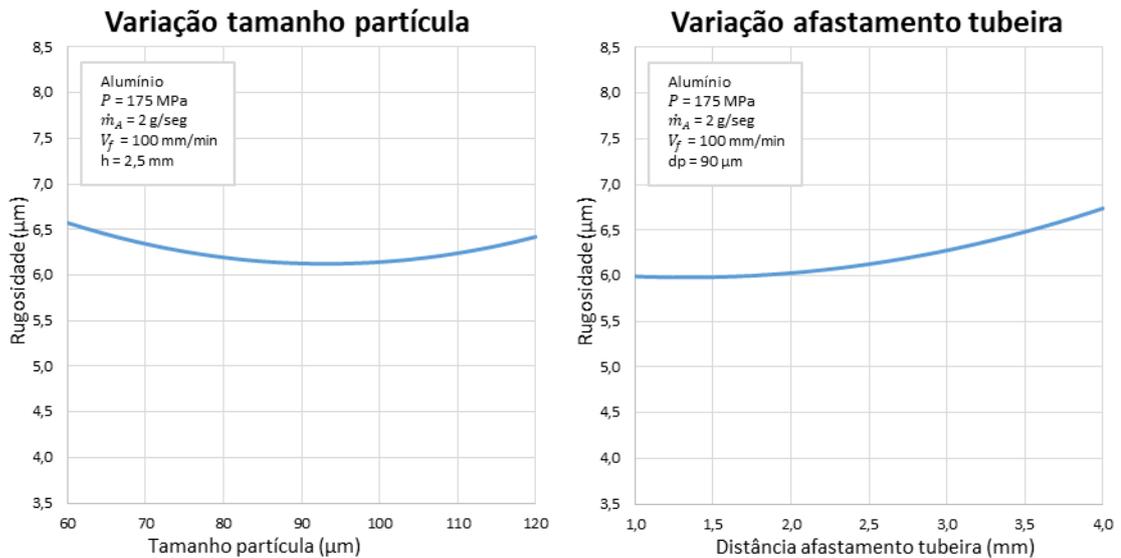


Figura 2.18 - Comportamento da rugosidade como função do tamanho de partícula e distância de afastamento da tubeira, empregando o modelo de regressão de Çaydas e Hasçalık, 2008.

O gráfico da Figura 2.18 mostra que a variação no tamanho da partícula e na distância de afastamento da tubeira tem pouca influência no comportamento da rugosidade, uma vez que a variação total no valor predito é menor do que 1  $\mu\text{m}$  para ambos os casos.

Zhang et al., 2011 realizaram diversos experimentos para determinar o comportamento do jato abrasivo e a influência dos parâmetros de processo sobre a rugosidade da superfície usinada, utilizando a liga de titânio Ti-6Al4V. A rugosidade foi medida a 1 mm de distância da borda do corte na superfície de entrada (região superior) do jato e a 1 mm da borda do corte na superfície de saída (região inferior) do jato, resultando em um modelo empírico para a predição da rugosidade na região superior e inferior da superfície usinada por AWJ, de acordo com as Equações 2.11 e 2.12.

$$R_{atop} = \frac{33142,12P^{0,1241}d_f^{0,4245}}{Q^{0,2735}t^{0,2052}} \quad (2.11)$$

$$R_{abottom} = \frac{1216459P^{0,8326}d_f^{0,742}t^{0,1324}}{Q^{0,937}} \quad (2.12)$$

Onde  $R_{atop}$  é a rugosidade na região superior do corte [ $\mu\text{m}$ ],  $R_{abottom}$  é a rugosidade na região inferior do corte [ $\mu\text{m}$ ],  $P$  é a pressão da água [MPa],  $t$  é a espessura da amostra [mm],  $d_f$  é o diâmetro do tubo de mistura [mm] e  $Q$  é o índice de qualidade da superfície. O comportamento do modelo de Zhang et al., 2011 perante a variação dos parâmetros de processo pode ser visualizado na Figura 2.19 e Figura 2.20.

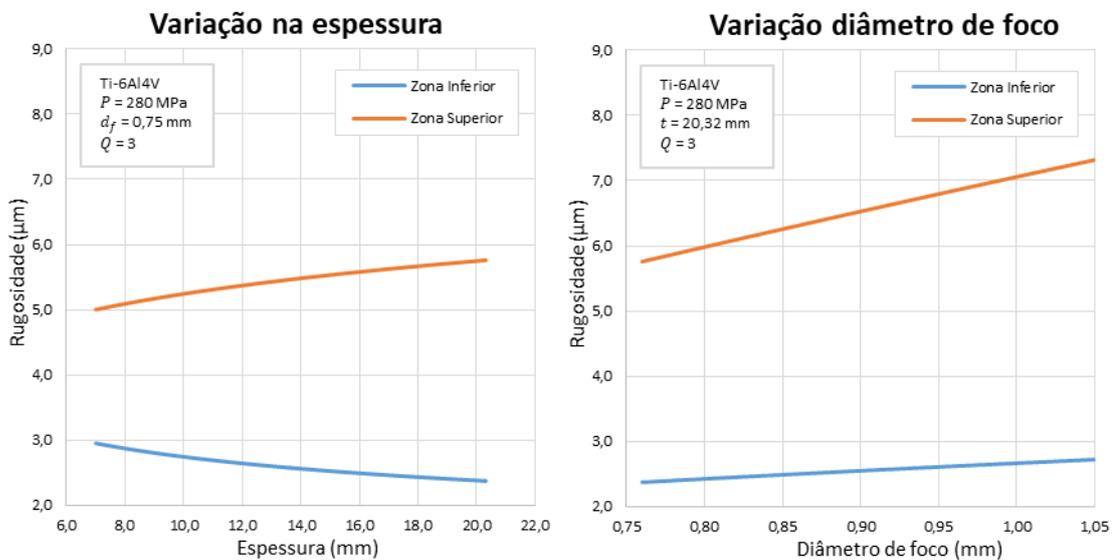


Figura 2.19 - Comportamento da rugosidade como função da espessura e do diâmetro de foco empregando o modelo de Zhang et al., 2011.

Na Figura 2.19 verifica-se um comportamento diferente da parte superior e inferior da peça na variação da espessura, onde existe uma tendência de aumento da rugosidade da parte inferior com o aumento da espessura da peça, enquanto que na zona superior, a rugosidade tende a diminuir com o aumento da espessura. Já o aumento no diâmetro de foco causa uma elevação da rugosidade tanto para a parte superior como inferior da peça.

Nos gráficos da Figura 2.20 verifica-se que o aumento da pressão de água causa elevação da rugosidade em ambas as zonas (superior e inferior) e o aumento no índice de qualidade tende a reduzir a rugosidade de toda a superfície. De acordo com os resultados apresentados por Zhang et al., 2011, é válido afirmar que a alteração dos parâmetros de corte influencia diretamente no acabamento da superfície cortada, principalmente com o aumento da espessura do componente cortado. Contudo, os autores não relacionam qual é o limite de espessura da peça de trabalho que pode ser considerada.

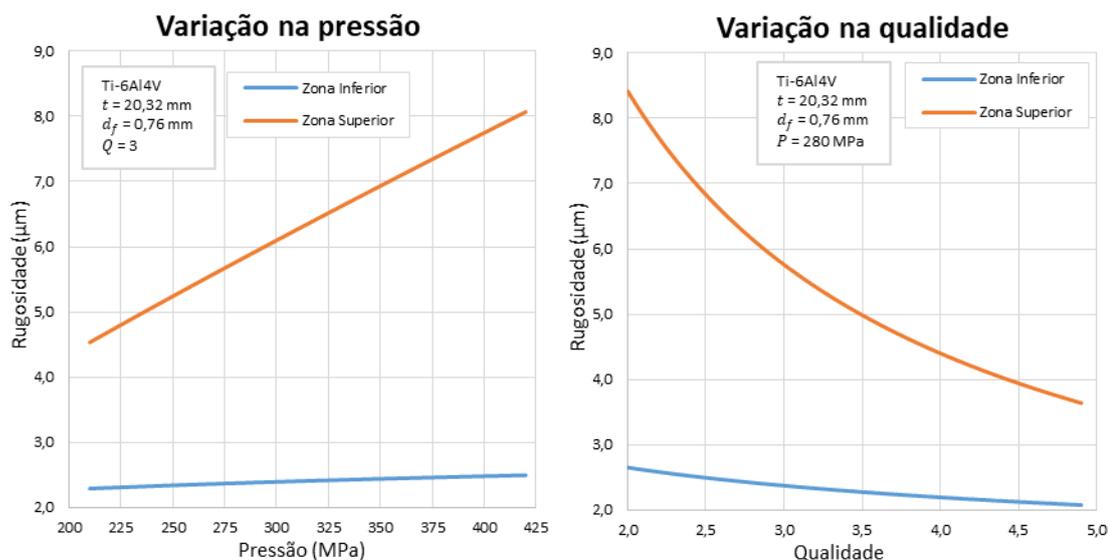


Figura 2.20 - Comportamento da rugosidade como função da variação da pressão e do índice de qualidade, empregando o modelo de Zhang et al., 2011.

Selvan et al., 2012 estudaram a influência dos principais parâmetros variáveis de entrada no processo AWJ sobre a rugosidade de componentes de alumínio cortados por AWJ. Os autores verificaram o efeito da variação da pressão da água, da velocidade de avanço, da vazão mássica de abrasivo e da distância de afastamento da tubeira. A medição da rugosidade foi realizada por meio de um perfilômetro de contato no centro de corte da amostra. Os resultados apresentados indicam que o aumento na pressão de água e na vazão mássica de abrasivo causam redução na rugosidade. Ainda, indicam que o aumento da velocidade de avanço e da distância de afastamento da tubeira causam elevação na rugosidade. Estes resultados divergem em alguns pontos dos modelos apresentados anteriormente, indicando aplicações realizadas em materiais e condições diferentes tendem a apresentar comportamento também diferente. Mesmo ao realizar a comparação com um trabalho que utilizou-se do mesmo material base (alumínio de Çaydas e Hasçalık, 2008) o comportamento da pressão e vazão de abrasivo mostrou-se divergente em ambos os estudos.

Hajdarevic et al., 2015 desenvolveram um estudo para verificar a influência da velocidade de avanço e da vazão mássica de abrasivo na rugosidade da superfície de corte em amostras de alumínio com 15 e 30 mm de espessura, cortadas por AWJ. A rugosidade da superfície de corte foi medida em diferentes afastamentos da superfície de entrada do jato. Os autores verificaram que a rugosidade aumenta com o aumento da velocidade de avanço e diminui com o aumento da vazão mássica de abrasivo. Em certas faixas de variação da velocidade de avanço e da vazão mássica de abrasivo, a mudança na rugosidade é muito

pequena, sendo recomendável usar uma velocidade de avanço maior e uma vazão de abrasivo menor para melhorar a relação custo-benefício do processo.

## **2.6 Avaliação da largura de fenda no processo AWJ**

A largura de fenda desempenha um papel importante no planejamento do processo AWJ. As dimensões finais da peça dependem da largura da fenda de corte. A linha de corte programada pode ser compensada e a dimensão final do componente depende de como se compensa o desvio causado pela remoção do material na trajetória de corte. Esta seção discute o efeito dos diferentes parâmetros de processo sobre a largura de fenda no processo AWJ, baseado na revisão bibliográfica.

Ramulu e Arola, 1993 desenvolveram um estudo experimental sobre a largura de fenda em compósito de grafite. De acordo com os autores, a distância de afastamento da tubeira é o parâmetro com maior contribuição sobre a largura de fenda no topo do perfil de corte, sendo que quanto maior for esta distância, maior será a largura de fenda. Já o aumento na velocidade de avanço atua na direção oposta, reduzindo a largura de fenda quanto maior for o seu nível. Contudo, com o aumento da espessura, a velocidade de avanço passa a ter maior influência sobre a largura de fenda, sendo que a largura reduz significativamente em maiores profundidades de medição ao se elevar a velocidade de avanço.

Outro estudo realizado por Douflou, Kruth e Bohez, 2001 investigaram o perfil resultante do corte variando a pressão de trabalho, a velocidade de avanço, a distância de afastamento da tubeira e o ângulo de inclinação do jato abrasivo. O material utilizado como teste foi aço (de tipo não especificado), com espessura de 2,6 mm. De acordo com os autores, a distância de afastamento da tubeira é a variável que mais possui influência sobre a variação da largura de fenda, sobretudo na parte superior do corte.

Karakurt, Aydin e Aydiner, 2014 investigaram o comportamento dos diferentes parâmetros de processo sobre a largura de fenda resultante em rochas graníticas. Os autores utilizaram-se de diversas qualidades de granitos com espessura de 30 mm para realizar um estudo experimental em que as variáveis de processo foram a velocidade de avanço, a vazão mássica de abrasivo, a distância de afastamento da tubeira, a pressão da água e o tamanho do grão abrasivo. Os resultados indicam que a distância de afastamento da tubeira e a velocidade de avanço são os parâmetros de maior efeito sobre a largura de fenda, onde menores distâncias de afastamento da tubeira e maiores velocidades de avanço produzem as menores combinações de largura de fenda. Além disto, os autores obtiveram um modelo de regressão de primeira

ordem que permite prever a largura de fenda em função dos diferentes parâmetros variáveis de entrada do processo.

Um estudo semelhante foi realizado por Gupta et al., 2014, onde os autores utilizaram como material de estudo amostras de uma qualidade de mármore, utilizando um valor constante de distância de afastamento da tubeira para todas as amostras. As variáveis de entrada foram a velocidade de avanço, a pressão da água e a vazão mássica de abrasivo. Os resultados indicaram que a velocidade de avanço é o fator de maior influência sobre a largura de fenda no corte de mármore, sendo que com o aumento da velocidade de avanço, diminui a largura de fenda do corte. Já a pressão de água mostra-se significativa, mas com menor efeito sobre a largura de fenda, destacando-se o fato de o aumento da pressão de trabalho perder efetividade na remoção do material a partir de determinados níveis (270 MPa).

Um estudo sobre o efeito da velocidade de avanço sobre a largura de fenda em placas de revestimento cerâmico foi realizada por Krajcarz et al., 2017. Neste trabalho, todas as variáveis de processo foram mantidas constantes, exceto a velocidade de avanço, que variou de 10 a 2000 mm/min. Os resultados indicaram que para uma velocidade de 100 mm/min, a largura de fenda nas partes superior e inferior foram iguais, sendo que a largura sempre diminui ao se elevar a velocidade de avanço.

## **2.7 Perfuração no processo AWJ**

A etapa de perfuração desempenha um importante papel no processo AWJ em ágata. Quando o corte não inicia na lateral do componente ou não existir um furo prévio obtido por outro processo, o recorte por AWJ inicia pelo processo de perfuração (*piercing*). De acordo com Fredin e Jonsson, 2011, tempo e recursos pode ser economizado se os parâmetros de perfuração forem escolhidos corretamente.

O impacto do jato em altas pressões pode causar danos ao material que inutilizem a peça. Já a redução da pressão de entrada ocasiona a elevação do tempo de perfuração e, conseqüentemente, do custo do processo. Ainda, vale ressaltar que a maioria das publicações em AWJ para materiais frágeis é concentrada nas características morfológicas da fenda, com pouco ou nenhum foco sobre a etapa de perfuração, que corresponde à fase inicial do processamento via AWJ [Schwartzentruber e Papini, 2015].

Os principais métodos de perfuração no processo AWJ podem ser classificados em quatro tipos: estacionária, em que o cabeçote se mantém parado até o jato atravessar totalmente a peça; agitada (*wiggle* ou *dwell piercing*), em que o cabeçote se move para frente e para trás em uma distância muito pequena durante a perfuração; dinâmica, em que o cabeçote inicia fora

da peça e é movido gradualmente para dentro do material; e baixa pressão, em que a pressão é gradualmente elevada até a pressão de trabalho [OMAX, 2016].

Fredin e Jonsson, 2011 determinaram experimentalmente os parâmetros com maior influência no tempo de perfuração por AWJ em ligas de aço inox de 10 a 70 mm de espessura. Os autores realizaram mais de 700 furos para identificar que a estratégia de perfuração agitada é geralmente mais rápida que a estacionária. Também verificaram que maiores distâncias de afastamento da tubeira são preferidas, sem causar aumento no tempo total de perfuração.

Li e Wang, 2015 estudaram a perfuração por AWJ na liga de titânio Ti6Al4V, buscando compreender a influência da pressão da água e do tempo de perfuração na profundidade e diâmetro dos furos resultantes. Foram realizados 24 amostras de perfuração usando quatro níveis de pressão e seis níveis de tempo de perfuração. Os autores identificaram que tanto a pressão da água quanto o tempo de furação ocasionam o aumento da profundidade e do diâmetro obtidos via AWJ, mantidos os demais parâmetros de processo constantes.

Schwartzentruber e Papini, 2015 desenvolveram um estudo acerca da micro-perfuração em vidro usando AWJ, buscando identificar os parâmetros de processo que mais causam danos ao material. Os parâmetros de processo investigados foram a pressão, distância de afastamento da tubeira, tempo de perfuração e tubo de mistura, em um projeto fatorial completo com três réplicas para três diferentes tipos de tubo de mistura, totalizando 72 amostras. De acordo com o estudo, maiores pressões produzem maiores defeitos na perfuração e maiores distâncias de afastamento da tubeira produzem maiores diâmetros.

## **2.8 Jato de água com abrasivo em materiais cerâmicos e rochas**

O processo de jato de água com abrasivo é muito utilizado no corte de materiais cerâmicos e rochas, sendo que diversos trabalhos abordam a influência dos parâmetros do processo na qualidade final do produto. A Tabela 2.7 apresenta um resumo dos artigos encontrados na literatura quanto ao tema principal de estudo, sendo que os pontos de interesse para este trabalho são descritos a seguir.

Barp et al., 2011 desenvolveram um estudo sobre a viabilidade de utilização do processo AWJ para o corte de ágatas em formas complexas. Através da realização de 24 ensaios com diferentes geometrias, os autores verificaram que o processo AWJ pode ser utilizado em chapas de ágata com pelo menos 3,5 mm de espessura para formas complexas. A mínima espessura de parede para a geometria encontrada foi de 2 mm. Todos os parâmetros de processo foram mantidos constantes neste estudo.

A influência das variáveis de entrada sobre as características do processo e sobre os resultados de trabalho no corte por AWJ de três tipos de granitos usinados por AWJ foi abordado no trabalho de Aydin et al., 2011. No estudo, foram variados cinco parâmetros: velocidade de avanço, vazão mássica de abrasivo, distância de afastamento da tubeira, pressão de água e tamanho da partícula abrasiva. Os resultados apresentados indicaram que, para todos os parâmetros estudados (exceto o tamanho da partícula), o aumento no nível do parâmetro produz uma rugosidade maior. Os parâmetros de maior influência na rugosidade são a pressão da água e a vazão mássica de abrasivo. De acordo com os autores, não há indícios que a composição química e as propriedades mecânicas dos materiais estudados possuam uma relação clara com a rugosidade, sendo esta afetada diretamente pelos parâmetros de processo.

Tabela 2.7 - Estudos relacionados ao processo AWJ em rochas e materiais cerâmicos.

<b>Autores</b>	<b>Materiais</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Objetivo</b>
Khan e Haque, 2007	Vidro	Material Abrasivo $V_f$ , $P$ , $d_s$	Ângulo fenda
Barp, Neis e Ferreira, 2011	Ágata	Espessura	Geometria corte
Karakurt, Aydin e Aydiner, 2012	Granito	Resistência à compressão	$R_a$ , $h$ Ângulo fenda
Silveira, 2011	Ágata	$V_f$	Geometria corte
Engin, 2012	Granito/mármore	$P$ , $V_f$ , $m_A$	Profundidade de corte
Karakurt, Aydin e Aydiner, 2012	Granito	$P$ , $V_f$ , $m_A$ , $d_s$ , $d_p$	Profundidade corte
Karakurt, Aydin e Aydiner, 2014	Granito	$P$ , $V_f$ , $m_A$ , $d_s$ , $d_p$	Largura fenda
Engin, Bayram e Yasitli, 2013	Granito/mármore	AWJ e CS	Eficiência energética
Aydin, 2014	Granito	Material abrasivo	Reuso abrasivo
Gryc, et al., 2014	Mármore	AWJ e WJ	Profundidade de corte
Silva, 2013	Ágata	$V_f$ , $h$	Largura fenda Geometria
Gupta, et al., 2014	Mármore	$V_f$ , $P$ , $m_A$	Ângulo de fenda

Um estudo para determinar a espessura máxima de corte em diferentes tipos de granito foi realizado por Karakurt et al., 2012. Investigou-se a influência dos parâmetros do processo (velocidade de avanço, vazão de abrasivo, distância de afastamento da tubeira, pressão e tamanho de abrasivo) e propriedades dos materiais na profundidade máxima do corte. Neste estudo, a velocidade de avanço mostrou-se como o parâmetro mais significativo para todos os materiais estudados, seguidos pelo tamanho e pela vazão mássica do abrasivo. Dessa forma, verificou-se que a profundidade máxima de corte diminui com o aumento da velocidade de avanço e com a redução do tamanho do grão abrasivo.

Já Silva, 2013 desenvolveu um estudo para a utilização do processo AWJ na fabricação de anéis de ágata. Através da realização de ensaios preliminares, verificou-se a existência de defeitos relacionados ao ângulo de fenda e aos desvios dimensionais, o que levou a investigar o efeito da velocidade de avanço no tamanho da fenda. Foram realizados testes com duas espessuras diferentes de chapas de ágata (12 e 5 mm), variando a velocidade de avanço de 5 a 50 mm/min na chapa de 12 mm e de 10 a 100 mm/min na chapa de 5 mm. Os resultados indicaram que a redução da velocidade de avanço ocasiona o aumento da largura da fenda para este material. Com base nestes ensaios, realizou-se uma estimativa inicial de parâmetros para realizar a usinagem em espessuras maiores do que 10 mm, indicando que a velocidade de avanço adequada para a fabricação de anéis em ágata de 12 mm de espessura deve ser de aproximadamente 10 mm/min, e a distância de afastamento da tubeira deve se manter em 3 mm. Outros fatores como variação na pressão, vazão mássica de abrasivo e demais parâmetros não foram considerados neste estudo.

## **2.9 Considerações sobre a revisão bibliográfica**

Os fundamentos básicos sobre o processo AWJ são amplamente discutidos na literatura. Praticamente todos os autores pesquisados abordam o tema de maneira semelhante, com pequenas distinções em relação aos diversos tipos de equipamentos que podem ser utilizados e suas peculiaridades. Assim, ressalta-se que é de fundamental importância o conhecimento dos fatores do processo que podem influenciar na qualidade final da peça.

A medida da qualidade da superfície usinada via AWJ inclui diversas propriedades geométricas e de topografia da superfície. Duas diferentes abordagens foram encontradas na literatura para a definição e quantificação da qualidade, mas ambas são deficitárias quanto a utilização de critérios objetivos e à combinação das diferentes condições geométricas. A abordagem realizada pela Norma ISO/TC 44 1770, 2010 possui uma combinação de parâmetros quantitativos e qualitativos, mas se mostra de aplicação confusa e pouco prática, o que pode ter levado à sua baixa aceitação pelos pesquisadores. Assim, a maioria dos estudos desenvolvidos concentra-se na avaliação de parâmetros de qualidade isolados, como a rugosidade, ângulo e largura de fenda, inclinação de marcas de estrias, não levando em consideração um padrão comum nem a combinação entre todos estes parâmetros.

Dentre os diversos estudos acerca da rugosidade na superfície cortada por AWJ, é possível constatar que existem diferentes abordagens para realizar a predição da qualidade. Através de uma modelagem conceitual, os principais estudos encontrados foram realizados por Vikram e Babu, 2002; Zhang et al., 2011; Hloch e Valíček, 2012. Estes modelos consideram,

além dos parâmetros de processo, características do material a ser usinado, dos grãos e do jato abrasivo, sendo possível realizar a sua generalização para qualquer material e equipamento. Contudo, é justamente neste ponto que se inserem as suas limitações. Uma vez que todos os parâmetros referentes ao material devam ser conhecidos (como a densidade e resistência à flexão, por exemplo), a sua utilização em novos materiais depende de ensaios e testes preliminares. Também, existe uma grande dificuldade em definir alguns parâmetros referentes ao próprio processo, como o diâmetro efetivo do jato no momento do corte e a pressão da água. A pressão da água, em especial, oscila durante a realização do corte, dificilmente permanecendo em um valor constante durante muito tempo. Já o jato abrasivo, como mostrado no experimento de Zhang et al., 2011, também possui uma vibração que faz com que o diâmetro do jato varie em função do tempo. Desta forma, a aplicação dos modelos só é possível se forem efetuadas diversas simplificações e aproximações, prejudicando o resultado final.

A maior parte dos trabalhos encontrados na literatura utiliza a abordagem experimental, que apesar da necessidade da realização de experimentos com diferentes parâmetros do processo e materiais, tendem a ter um elevado grau de precisão na predição dos resultados e servem como ponto de partida para a realização de otimizações. Os trabalhos de Curham et al. 1989; Burnham e Kim, 1989; Webb e Rajukar, 1990 utilizam modelos de regressão bastante simplificados, que levam em consideração poucos parâmetros do processo. Já o modelo utilizado por Kovacevic, 1991 pode ser considerado como o mais versátil e com maior viabilidade de aplicação, uma vez que podem ser considerados diversos parâmetros do processo para diferentes aplicações. As desvantagens desta abordagem consistem no grande volume de dados necessários para a obtenção dos parâmetros de regressão e na sua aplicação restrita, ou seja, o modelo somente funciona para as condições as quais foram originadas (materiais e níveis de variação de parâmetros). Assim, para efetuar a predição de um novo tipo de material é necessário refazer o procedimento experimental para a obtenção dos parâmetros de regressão para esta condição. Diversos estudos foram derivados da aplicação desta abordagem, como pôde ser observado nas seções anteriores.

Ao analisar o comportamento dos modelos empíricos em relação à variação dos parâmetros variáveis de entrada do processo torna-se evidente que não há um consenso entre os pesquisadores sobre qual parâmetro possui mais influência na rugosidade da superfície cortada. Ainda é possível observar que, para diferentes materiais cortados, o comportamento da rugosidade tende a variar dependendo da combinação de parâmetros. Aqui cabe lembrar dois estudos. No trabalho apresentado por Ramulu e Arola, 1994, a rugosidade tende a reduzir com o aumento da pressão. Já no artigo de Çaydas e Hasçalık, 2008, a rugosidade tende a aumentar

com a elevação da pressão. Os dois estudos utilizaram procedimentos experimentais semelhantes, mas com resultados divergentes, sendo que este fato pode ser atribuído aos materiais usinados (compósito de grafite/epóxi e materiais metálicos). Desta forma, é válido concluir que cada conjunto material/máquina/parâmetros de processo irá apresentar um comportamento diferente no AWJ.

Com base nos dados encontrados na literatura, é possível constatar que estudos referentes ao processamento via AWJ de materiais cerâmicos, em especial rochas e materiais naturais, ainda são escassos e com pouco aprofundamento em relação aos aspectos de qualidade da superfície cortada. Os únicos estudos encontrados que relacionam parâmetros de qualidade são os trabalhos de Silva, 2013, que faz uma abordagem específica para a fabricação de anéis de ágata, e Aydin et al., 2011, que apresenta um estudo mais complexo em relação aos parâmetros de processo, sem contudo considerar o aumento da rugosidade com a profundidade da peça. Ainda cabe salientar que rochas e materiais naturais tendem a ter espessura de trabalho maior que metais e compósitos, o que acaba tornando a qualidade da superfície cortada ainda mais importante.

Com base nestes dados verifica-se que, apesar do grande volume de trabalhos relacionados a investigação da influência dos parâmetros de processo na qualidade da superfície usinada por AWJ, ainda existem lacunas que precisam ser melhor compreendidas. Desta forma, se faz necessário o desenvolvimento de uma investigação completa que possibilite determinar de maneira simples e eficaz a qualidade da superfície, bem como um critério simples e objetivo para avaliação da qualidade.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho. As seções a seguir buscam detalhar os métodos, equipamentos, e procedimentos que foram realizados, bem como a sua contribuição para o alcance dos objetivos do projeto.

#### 3.1 Metodologia de execução do trabalho

A Figura 3.1 apresenta um fluxograma esquemático da metodologia utilizada na execução do trabalho.

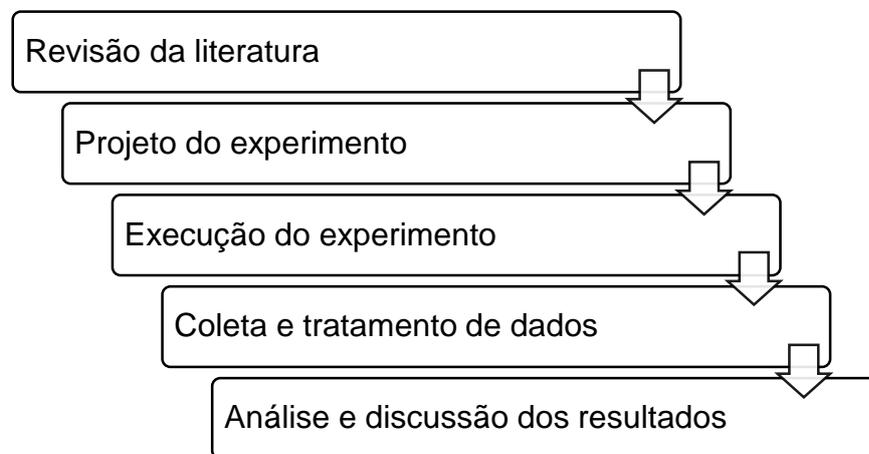


Figura 3.1 - Metodologia de execução do trabalho.

Na etapa de **revisão da literatura** foram buscados os fundamentos básicos para o bom entendimento e execução da pesquisa. Os conhecimentos e definições mais importantes foram resumidos e estão apresentados no capítulo 2.

Na fase de **projeto do experimento** foi realizada a definição das variáveis controláveis e não controláveis, fatores de ruído, tipo de randomização, réplicas e variáveis de resposta. Nesta fase também foi determinado o tipo e o número de experimentos, os materiais e equipamentos para a realização do ensaio, coleta e tratamento dos dados.

A **execução do experimento** compreende a fase onde foram realizados os experimentos de perfuração e de corte em equipamento AWJ. Foram realizadas duas rodadas de experimentos de perfuração e duas rodadas para o experimento de corte, que serão detalhadas nas seções a seguir.

Em seguida, foi realizada a etapa de **coleta e tratamento de dados**, responsável pela medição dos diferentes respostas de qualidade, (tempo de perfuração, largura de fenda, desvio de perpendicularidade, rugosidade e profundidade suavizada).

Os dados coletados foram submetidos a **análises estatísticas** que permitiram extrair modelos empíricos e compreender o comportamento e a influência dos diferentes parâmetros de entrada sobre os critérios de qualidade escolhidos para análise.

### 3.2 Materiais, equipamentos e softwares

A máquina operatriz utilizada durante os ensaios é apresentada na Figura 3.2, com seus componentes principais. O equipamento, fabricado pela empresa chinesa *Shanghai Golden Arrow Automatic Equipment & Technology Development*, modelo JJ-II42-1010, possui pressão máxima de trabalho de 420MPa, potência de 40HP e bancada de trabalho de 1000 x 1000 mm. Está instalada no Centro Tecnológico de Pedras, Gemas e Joias do RS, na cidade de Soledade/RS.



Figura 3.2 - Máquina de corte por jato de água abrasivo utilizada nos experimentos: em A) unidade de pressurização; em B) unidade de corte; em C) unidade de comando; em D) unidade de alimentação de abrasivo; em E) unidade de refrigeração.

O material escolhido para a realização das amostras foi a ágata, usado na fabricação de artefatos decorativos e joias. A ágata geralmente é transformada em chapas que posteriormente são levadas ao equipamento AWJ para conferir o formato desejado. As chapas usadas para o processamento via AWJ possuem, em geral, entre 5 a 20 mm de espessura, popularmente

denominadas no comércio local como chapas finas e chapas grossas. A Figura 3.3 apresenta exemplos de chapas de ágata utilizadas nos experimentos.

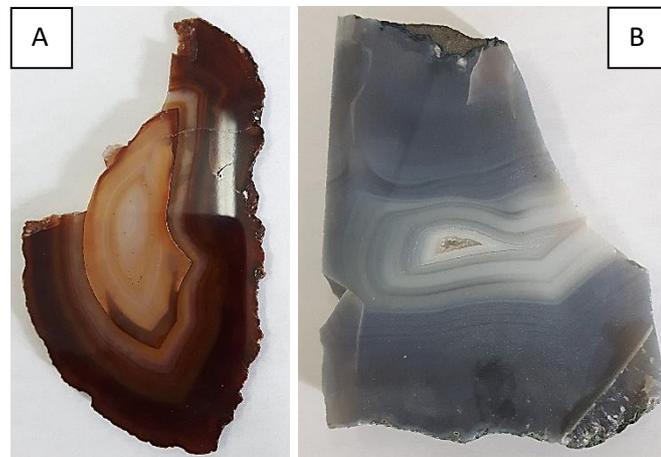


Figura 3.3 – Exemplos de chapas de ágata utilizada no experimento. Em A), chapa fina, com espessura média de 5 mm; em B) chapa grossa, com espessura média de 15 a 20 mm.

A medição da espessura das amostras foi realizada com auxílio de um paquímetro gemológico *Presidium*, com resolução de 0,1 mm. As medições de rugosidade foram executadas com auxílio de dois rugosímetros de contato (Figura 3.4). O rugosímetro portátil Mitutoyo SurfTest SJ-210 possui curso de medição de 360  $\mu\text{m}$  e resolução máxima de 0,02  $\mu\text{m}$ . O rugosímetro compacto Mitutoyo SurfTest SJ-410 possui curso de medição de 800  $\mu\text{m}$  e resolução máxima de 0,01  $\mu\text{m}$ , e permite obter, além do valor da rugosidade, o perfil da superfície traçada.

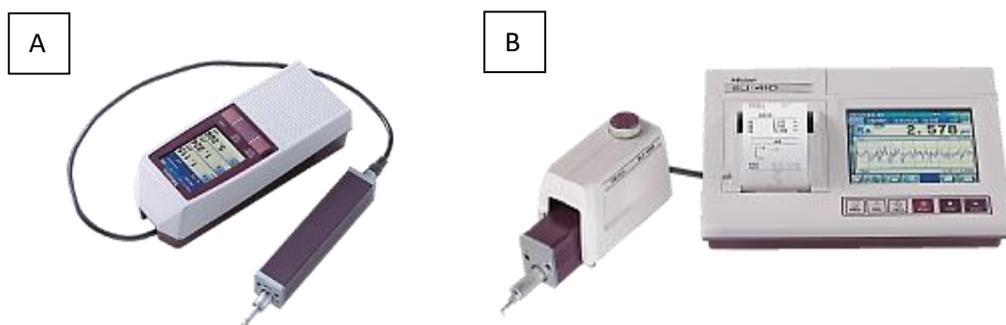


Figura 3.4 – Rugosímetros utilizados nos experimentos. Em A) Mitutoyo SJ-210; em B) Mitutoyo SJ-410. Adaptado de Mitutoyo, 2018.

Para a filmagem dos experimentos e perfuração e e registrou das amostras para este trabalho utilizou-se uma câmera digital Nikon Coolpix L820 com zoom óptico de 30x, posicionada sobre um tripé convencional. A câmera possui resolução de 16 *megapixels*, sendo que sua resolução de filmagem é de 1920x1080 *pixels* e cadência de 30 quadros por segundo (fps).

A medição da largura de fenda e do desvio de perpendicularidade foi efetuada a partir de imagens tridimensionais reconstruídas a partir de microtomografia computadorizada de raios-X. Esta técnica consiste em posicionar a amostra sobre uma plataforma giratória entre uma fonte e um detector de raios-X. A amostra executa um giro completo sobre a plataforma, e para cada posição definida é extraída uma imagem de raio-X. Através da sobreposição das imagens bidimensionais, o *software* efetua a reconstrução do modelo tridimensional da amostra [Shimadzu do Brasil, 2018]. A Figura 3.5 (A) apresenta uma representação esquemática do funcionamento do processo de microtomografia de raios-X e a Figura 3.5 (B) apresenta o equipamento de microtomografia (InspeXio 90CT) utilizado neste trabalho.

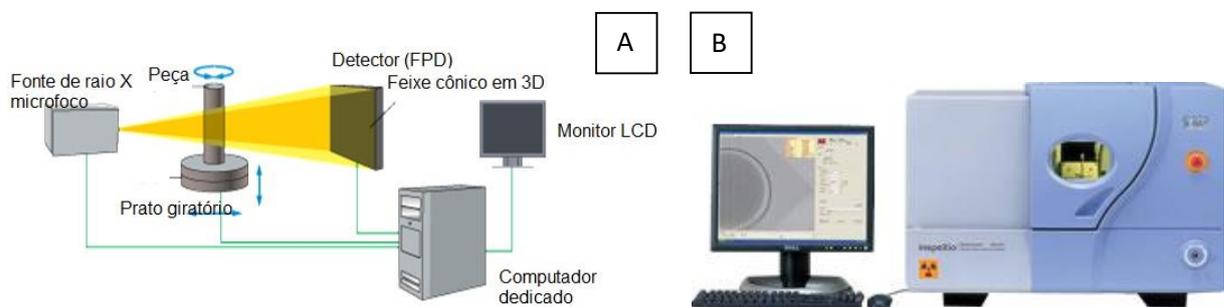


Figura 3.5 – Microtomografia de raios-X. Em A), representação esquemática do processo; em B), Microtomógrafo de raios-X inspeXio 90CT. Adaptado de Shimadzu do Brasil, 2018.

A coleta das imagens tomográficas foi realizada pelo software de reconstrução bidimensional CT-Scan, da *Shimadzu*, que acompanha o equipamento inspeXio 90CT. A transformação das imagens bidimensionais em tridimensionais foi realizada pelo software VG Studio Max V2.2. Apesar de possibilitar a realização de efetuar medições, a versão utilizada possui restrições de licença que não permitem efetuar todas as medições necessárias. Dessa forma, as imagens desejadas foram exportadas e a medição foi realizada através do software AutoCAD 2018. Para realizar o tratamento e análise dos dados, foram construídas rotinas em MATLAB 2016b. Os procedimentos estatísticos foram realizados com o auxílio do software Minitab 18. Todas versões utilizadas de softwares proprietários possuem licenças fornecidas pelas instituições (UFRGS e UPF) e ainda licenças educacionais adquiridas pelo autor.

### 3.3 Procedimento de medição das variáveis de resposta

Esta seção apresenta os métodos utilizados para realizar a medição das diferentes características de qualidade investigadas neste trabalho, através dos equipamentos descritos na seção 3.2. As variáveis de resposta que escolhidas para a caracterização da qualidade são:

- $t$  – espessura da peça de trabalho;

- $h_s$  – altura da zona suavizada;
- $R_a$  – rugosidade média;
- $k_W$  - largura de fenda;
- $u$  - desvio de perpendicularidade;
- $t_{perf}$  – tempo de perfuração.

### 3.3.1 Medição da espessura das peças de trabalho

As amostras utilizadas no experimento foram divididas em duas classes: chapas finas e chapas grossas. Utilizando o paquímetro gemológico, realizou-se a medição da espessura de todas as amostras através de cinco pontos alinhados, distantes em aproximadamente 7,5mm, na região de execução das linhas de corte. Isto possibilitou obter uma média do valor das espessuras de cada amostra e também de cada uma das classes (chapa fina e chapa grossa) utilizadas no experimento.

### 3.3.2 Medição da rugosidade

A rugosidade foi medida ao longo da espessura de corte, em linhas paralelas partindo do topo da superfície usinada (face mais próxima a entrada do jato abrasivo) em intervalos de 1,5 mm até o fundo da superfície de corte (face mais próxima a saída do jato abrasivo), como mostra a Figura 3.6. Para isto, a peça foi fixada em uma morsa e posicionada sobre um dispositivo que possui controle de avanço, com passo de 1,5 mm. As medições de rugosidade foram executadas com filtro de Gauss, comprimento de amostragem<sup>4</sup> ( $l_c$ ) de 2,5 mm e comprimento de avaliação de até 12,5 mm.

Os equipamentos utilizados (Figura 3.4) permitiram obter rugosidade no parâmetro médio ( $R_a$ ), bem como os dados referentes ao perfil de cada medição. A Figura 3.7 apresenta um exemplo de perfil de rugosidade construído em MATLAB a partir dos dados obtidos pelo rugosímetro *Mitutoyo SJ-410*. A relação completa dos perfis coletados e dos valores medidos pode ser visualizada nos Apêndices A e B.

---

<sup>4</sup> De acordo com a norma ISO 4288, 2008, o comprimento de amostragem adequado para uma medição de rugosidade  $R_a$  entre 2 a 10  $\mu\text{m}$  é de 2,5mm.

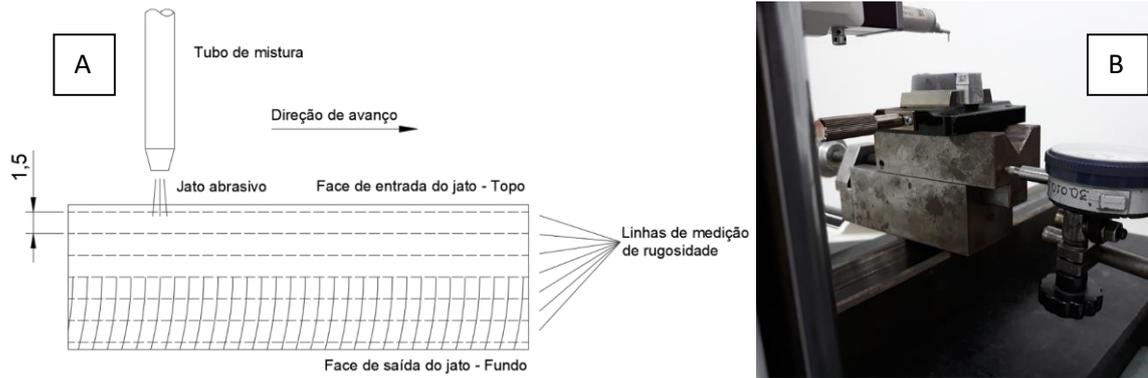


Figura 3.6 – Procedimento de medição de rugosidade. Em A) definição das linhas para medição; em B) aparato utilizado para realizar a medição da rugosidade.

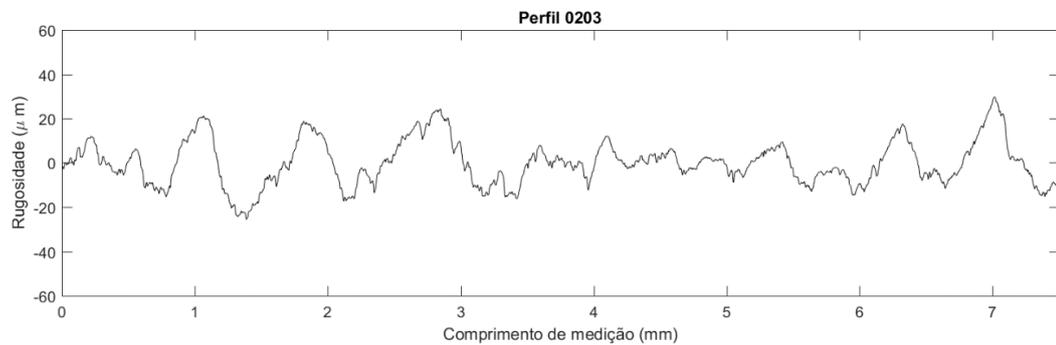


Figura 3.7 – Exemplo de perfil de rugosidade construído a partir dos dados coletados.

### 3.3.3 Medição da altura da zona suavizada

As superfícies usinadas de todas as amostras foram fotografadas, sendo que a partir do valor da espessura obtida com o paquímetro, as imagens foram importadas no software AutoCAD 2018 e ajustadas para a escala 1:1. Isto possibilitou realizar a medição da altura da zona suavizada ( $h_s$ ) em todas as amostras. A Figura 3.8 apresenta um exemplo de medição da zona suavizada realizada em algumas amostras. A relação completa das imagens onde foi realizada a medição da altura da zona suavizada é apresentada no Apêndice C.

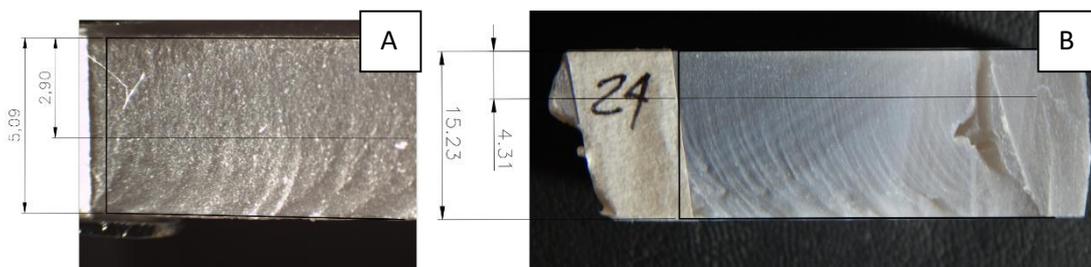


Figura 3.8 – Medição da altura de zona suavizada. Em A) amostra de chapa fina, em B) amostra de chapa grossa.

A identificação do tamanho da zona suavizada nas medições foi realizada visualmente pelo autor. Definiu-se, como critério de separação entre zona suavizada e zona ondulada a existência de defeitos superficiais visíveis a olho nu (estrias ou lascamentos). Apesar dessa forma de medição impor certo grau de subjetividade ao processo de medição, uma vez que depende da percepção pessoal no processo de identificação, seu uso justifica-se pela sua facilidade de aplicação prática, uma vez que não requer equipamentos especiais.

A fim de diminuir o grau de subjetividade na identificação das zonas suavizadas e onduladas, um estudo de percepção visual da zona de transição foi realizado com cinco usuários em dez amostras. Cada usuário realizou individualmente a identificação da linha de transição entre as zonas suavizada e ondulada em cinco fotografias de dez amostras.

A média da altura da zona suavizada deste estudo foi utilizada como base para obter-se uma estimativa sobre o valor da rugosidade na zona de transição suave/ondulada das diferentes amostras, bem como a relação destas zonas com os níveis de qualidade citados na NBR 8404 (descrito na seção 4.3.2). Ainda, salienta-se que não foi possível se utilizarem técnicas mais avançadas para a determinação da altura da zona suavizada, como a tomografia computadorizada, pois o equipamento utilizado não se mostrou eficaz para esta determinação.

### 3.3.4 Medição da largura de fenda e desvio de perpendicularidade

De acordo com a norma ISO 9013:2017, a largura de fenda ( $k_w$ ) é a distância de separação produzida pelo jato abrasivo medida na parte superior do corte. Já o desvio de perpendicularidade ( $u$ ) é definido como sendo a distância entre duas linhas paralelas tangentes em que o perfil da superfície de corte está inscrito. A norma ainda estabelece uma distância de redução da espessura ( $\Delta a$ ), a qual representa a área limite para realizar a medição do desvio de perpendicularidade e que varia em função da espessura da peça. A Tabela 3.1 apresenta os valores de redução da espessura sugeridos pela norma [ISO 9013, 2017].

Tabela 3.1 – Fator de redução de espessura  $\Delta a$ .

<b>Espessura da peça – <math>a</math> (mm)</b>	<b>Redução da espessura - <math>\Delta a</math> (mm)</b>
$\leq 3$	0,1 a
$>3 \leq 6$	0,3
$>6 \leq 10$	0,6
$>10 \leq 20$	1

Fonte: Adaptado de ISO 9013, 2017.

A Figura 3.9 apresenta exemplos de como efetuar a medição do desvio de perpendicularidade em cortes verticais, onde  $a$  representa a espessura total da peça a ser cortada,  $u$  o desvio de perpendicularidade e  $\Delta a$  a redução da espessura.

Para efetuar a medição da largura de fenda foi aplicado o mesmo critério de redução da espessura, a fim de evitar a área de arredondamento da aresta na entrada e padronizar o ponto de medição. Assim, para as chapas finas (espessura média de 5,3 mm) utilizou-se um fator de redução de espessura de 0,6 mm, e nas chapas grossas (espessura média de 13,7 mm) uma redução de espessura de 1 mm.

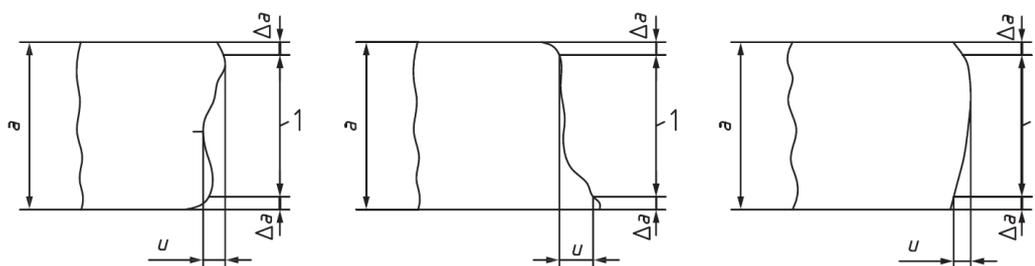


Figura 3.9 – Exemplo de medição do desvio de perpendicularidade. Adaptado de ISO 9013, 2017.

A medição da largura de fenda e do desvio de perpendicularidade foi efetuada com auxílio das imagens obtidas via microtomógrafo de raios-X InspeXio SMX-90CT (Figura 3.5) e dos softwares VGStudio Max 2.2 e AutoCAD 2018. Todas as amostras foram submetidas ao processo de digitalização, onde foi possível obter uma representação tridimensional da fenda de corte. A resolução do equipamento para construção dos modelos tridimensionais é de 0,05 mm. A Tabela 3.2 apresenta os parâmetros utilizados durante a captura das imagens no equipamento de microtomografia e a Figura 3.10 apresenta exemplos dos modelos tridimensionais reconstruídos pelo software VG Studio Max 2.2.

Tabela 3.2 – Parâmetros de aquisição de imagens tomográficas.

Parâmetro de captura	Valor
Tensão	90 kV
Corrente	110 $\mu$ A
Número de imagens	2400
Média	6
Contagem de escaneamento	1
Tamanho de imagem	1024x1024
Coefficiente de escala	50
Espessura da camada	1
Dados BHC	Alumínio

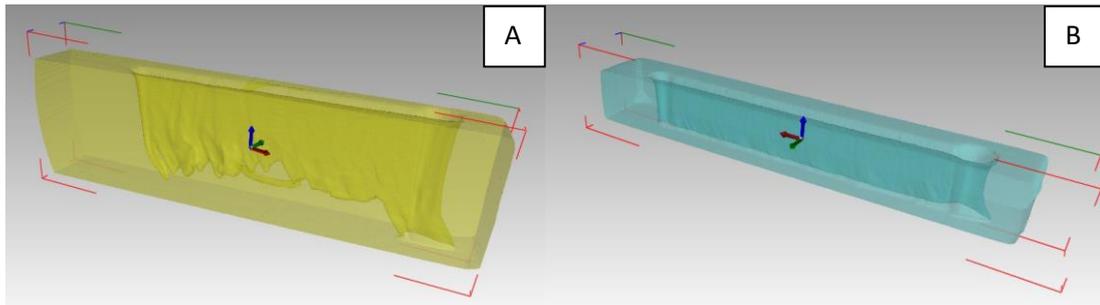


Figura 3.10 – Exemplo de amostras obtidas via digitalização tridimensional em microtomógrafo de raios-X. Em A), amostra nº 37, chapa grossa usinada a pressão de 260 MPa. Em B), amostra nº 13, chapa fina usinada a pressão de 260MPa.

Na representação tridimensional de cada amostra foram extraídas cinco seções transversais da linha de corte (Figura 3.11), sendo que o valor médio das medições foi utilizado nas análises estatísticas e construção dos modelos de regressão. A partir destas imagens realizou-se a medição da largura de fenda e do desvio de perpendicularidade (Figura 3.12). A relação completa das imagens onde foi realizada a medição da largura de fenda e desvio de perpendicularidade é apresentada no Apêndice D.

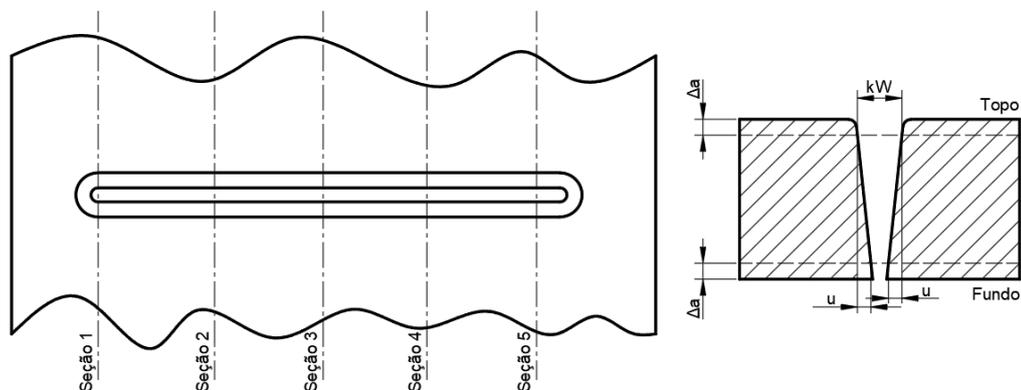


Figura 3.11 – Exemplo de extração de seções transversais para medição da largura de fenda e desvio de perpendicularidade.

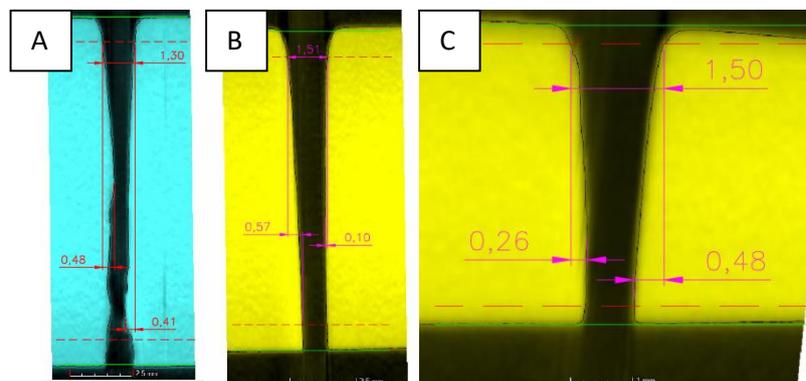


Figura 3.12 – Medição da largura de fenda e do desvio de perpendicularidade. Em A) e B) em amostras de chapa grossa, e em C), em amostra de chapa fina de ágata.

### 3.3.5 Medição do tempo de perfuração

O tempo de perfuração ( $t_{Perf}$ ) foi determinado indiretamente, reproduzindo a filmagem realizada com um software de edição de imagens (*Adobe Premiere CC*). Todos os experimentos de perfuração foram filmados a 30 quadros por segundo, sendo possível determinar para cada amostra o instante de perfuração, com intervalo entre quadros de 0,033 segundos. A Figura 3.13 apresenta um conjunto de quadros obtidos durante a coleta e tratamento dos dados.

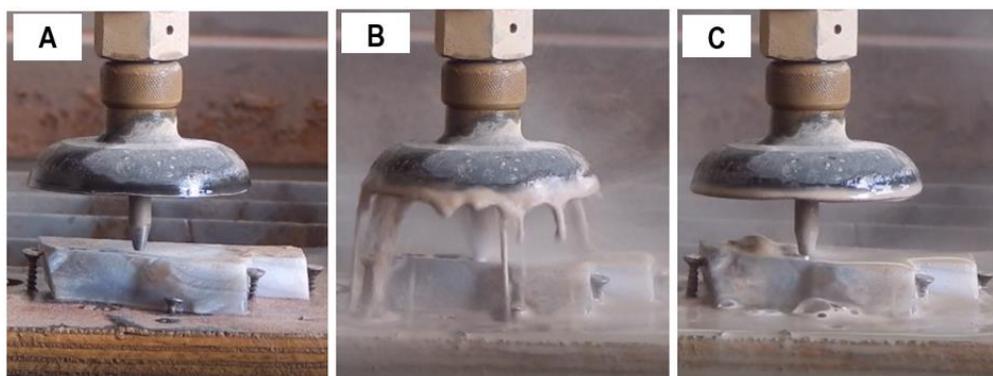


Figura 3.13 - Representação do processo de medição do tempo de perfuração em ágata via AWJ. Em A) posicionamento do cabeçote sobre a peça de trabalho; em B) início da perfuração com forte reflexão do jato; em C) fim da perfuração da peça.

A Figura 3.13 mostra três momentos distintos que ocorrem durante a etapa de perfuração no processo AWJ. Inicialmente (Figura 3.13 (A)), o tubo de mistura é posicionado sobre a peça no ponto exato onde se deseja efetuar a perfuração. Em seguida, o jato abrasivo é lançado sobre a superfície da peça, sendo refletido de volta contra o cabeçote, onde é absorvido por uma proteção de borracha instalada junto ao tubo (Figura 3.13 (B)). Por fim, a partir do momento em que ocorre a perfuração total e o jato atravessa a peça, não ocorre mais a reflexão do jato contra o tubo de mistura (Figura 3.13 (C)). A partir da observação deste fenômeno e também do ruído característico do impacto do jato abrasivo no tanque de amortecimento, determinou-se o tempo total de perfuração.

### 3.4 Determinação do critério de qualidade de percepção visual

Neste trabalho propõe-se realizar a avaliação da qualidade da superfície usinada via AWJ em ágata através de um critério de **qualidade de percepção visual** ( $Q_v$ ). Este critério baseia-se na relação existente entre a altura da zona suavizada ( $h_s$ ) e a espessura total da peça de trabalho ( $t$ ). O critério  $Q_v$  é obtido pelo quociente entre estes dois parâmetros, conforme a

Equação 3.1, e representa, em termo percentual, a quantidade da espessura da peça composta por zona suavizada.

$$Q_v = \frac{h_s}{t} 100\{\%\} \quad (3.1)$$

A diferença entre as zona suavizada e ondulada pode ser realizada visualmente e também através do valor da rugosidade  $Ra$ . Como zona suavizada entende-se a porção da superfície usinada via AWJ que não apresenta estrias nem defeitos visíveis, e como zona ondulada a porção da superfície que apresenta estrias, defeitos de lascamento e rebarbas. Esta forma de definição da qualidade atribui um ganho de objetividade em relação aos métodos descritos na literatura, pois implementa um método de fácil aplicação prática e que permite uma estimativa real do acabamento da peça usinada. Além disso, estabelecem-se os níveis de rugosidade para cada tipo de superfície, como será mostrado na seção 4.3.2. A Figura 3.14 apresenta um exemplo de aplicação do critério de qualidade  $Q_v$ .

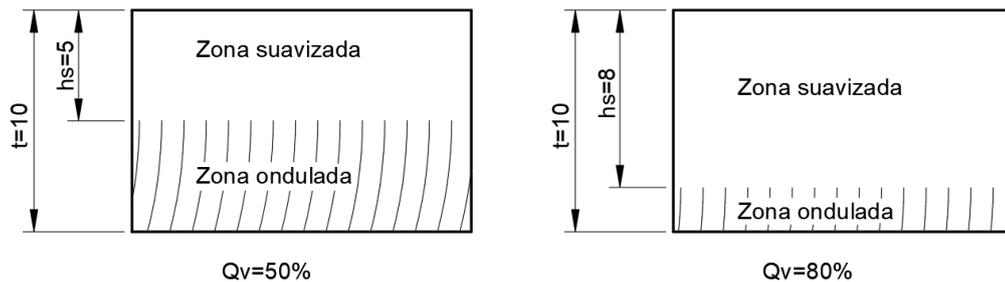


Figura 3.14 – Exemplo de aplicação do critério de qualidade de percepção visual  $Q_v$ .

A Figura 3.14 mostra que a aplicação do critério de qualidade  $Q_v$  torna a avaliação da superfície simplificada, sendo que quanto maior for o índice  $Q_v$ , maior será a proporção de superfície lisa, ou seja, sem a presença de estrias, lascas e outros defeitos, e conseqüentemente, maior será a sua qualidade.

### 3.5 Procedimento experimental

O projeto de um experimento consiste no reconhecimento e declaração do problema, na seleção da variável resposta, na escolha de fatores, níveis e faixas de estudo, do delineamento experimental, na realização do experimento, análise estatística dos dados e conclusões [Montgomery, 2012].

O **problema** principal que deve ser resolvido com a realização deste experimento consiste na verificação da influência dos diversos parâmetros do processo AWJ na qualidade de percepção visual da superfície usinada em ângulo, largura de fenda, desvio de perpendicularidade

e tempo de perfuração, bem como no desenvolvimento de uma forma de avaliar e prever esta qualidade.

### 3.5.1 Descrição de fatores e níveis de interesse

Em virtude do grande número de parâmetros de processo, foi elaborado um diagrama causa-efeito, apresentado na Figura 3.15, onde visualizam-se variáveis controláveis e não-controláveis que afetam as variáveis de interesse deste estudo.



Figura 3.15 - Diagrama causa efeito para o processo de corte via AWJ.

Como se observa na Figura 3.15, os fatores controláveis que afetam a qualidade do processo são:

- $V_f$  - velocidade de avanço do jato;
- $\dot{m}_A$  - vazão mássica do abrasivo;
- $P$  - pressão de trabalho;
- $dS$  - distância de afastamento da tubeira;
- $t$  - espessura do material de trabalho;
- material a ser usinado.

De acordo com os trabalhos encontrados na literatura, para cada material a ser cortado, os parâmetros comportam-se de maneira diferente nas variáveis de resposta, sendo crucial compreender o seu comportamento para realizar uma otimização do processo.

Destaca-se que durante a realização do corte, a **pressão de trabalho** dificilmente permanece constante, sendo que ocorrem variações em torno da pressão definida, que podem ser causadas pela distribuição de tensão da rede elétrica, vazão de água e avarias nos componentes do equipamento. Para minimizar o efeito negativo destas variações foi realizada uma manutenção de correção de vazamentos e peças danificadas, tornando o equipamento o mais confiável possível.

Ainda, pode-se apontar como fatores não controláveis a **temperatura ambiente** e a da **água**. Para isso, os experimentos de corte e perfuração foram realizados durante o menor período de tempo possível para cada tipo e rodada de experimentos. A água utilizada no processo é oriunda de um poço artesiano, o que mantém as propriedades da água semelhantes durante o processo. Todo o conjunto de cabeçote de corte (orifício de geração do jato, câmara e tubo de mistura) foi substituído antes da realização dos experimentos, reduzindo o efeito do desgaste destas peças no resultado final, utilizando-se apenas uma configuração de cabeçote para todos os experimentos. Utilizou-se também material abrasivo (granada) de mesmo fornecedor e lote, com o tamanho de grão constante e igual a 80 mesh.

Em relação ao material gemológico (ágata), foram utilizadas duas configurações de espessura (chapas finas e grossas). Ambas foram reaproveitadas a partir de rejeitos oriundos do próprio processo AWJ, em áreas recortadas não aproveitadas e chapas com defeitos (lascas ou trincas) que não possuem valor comercial de venda. As chapas finas possuíam tingimento de diferentes cores, e as chapas grossas não foram tingidas. Em todas as amostras procurou-se orientar o corte na região de massa criptocristalina das amostras, evitando regiões macrocristalinas, vazios e trincas.

Alguns parâmetros foram mantidos fixos durante a execução de todos os experimentos. Os parâmetros referentes ao cabeçote do corte (diâmetro, comprimento de tubo de mistura e diâmetro do orifício de geração do jato) foram mantidos constantes devido ao elevado custo de reposição destas peças, principalmente em relação ao tubo e câmara de mistura. O material abrasivo também foi mantido constante (em um único fornecedor), uma vez que a granada é o material mais utilizado e de menor custo para o processo AWJ. A Tabela 3.3 apresenta um resumo dos fatores mantidos constantes nos experimentos de corte e perfuração.

Tabela 3.3 - Fatores e níveis fixos para os experimentos de corte e perfuração.

Fator	Unidade	Nível fixo
Diâmetro tubo mistura	mm	0,8
Comprimento tubo mistura	mm	60
Diâmetro orifício	mm	0,2
Material abrasivo	-	Granada
Tamanho médio abrasivo	mm	0,18
	mesh	80

Foram utilizados diferentes velocidades de avanço em função da espessura do material, uma vez que maiores espessuras requerem menores velocidade de avanço.

### 3.5.2 Definição do projeto do experimento e sequência de execução das amostras

Durante a realização deste trabalho foram realizados quatro grupos de experimentos (subdivididos a partir de experimento de perfuração e de corte), realizados em espaços de tempo distintos, conforme esquema apresentado na Figura 3.16.

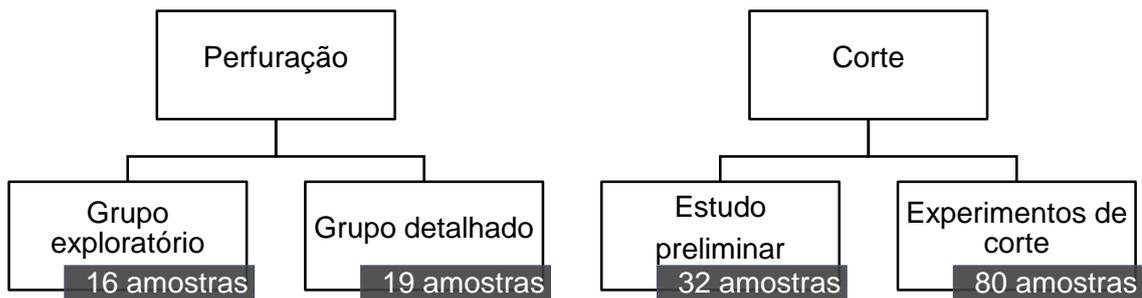


Figura 3.16 – Representação esquemática dos grupos de experimentos realizados durante o desenvolvimento do trabalho.

O **estudo de perfuração** foi subdividido entre grupo exploratório e detalhado. No **grupo exploratório**, o objetivo do estudo era identificar os fatores de menor influência no tempo de perfuração e que poderiam ser removidos em um estudo posterior. Assim, o experimento foi realizado levando em consideração sete variáveis de entrada:

- $d_s$  - distância de afastamento da tubeira;
- $P_i$  - pressão inicial de perfuração;
- $t_{Delay}$  - tempo de *delay*;
- $\dot{m}_A$  - vazão mássica de abrasivo;
- $t$  - espessura do material;
- *est* - estratégia de perfuração;
- $t_{iDelay}$  - tipo de *delay*.

Estes fatores foram escolhidos devido ao potencial de influência sobre a perfuração, por sua facilidade de variação (no caso de parâmetros de regulação) ou por interesse direto (espessura do material). Os demais fatores levantados foram mantidos constantes. A Tabela 3.4 apresenta os fatores e níveis utilizado no grupo exploratório de experimentos de perfuração.

Tabela 3.4 – Fatores e níveis utilizados no grupo exploratório de experimentos de perfuração.

Fator	Unidade	Nível baixo	Nível alto
<b>Dist. afast. tubeira</b>	$d_S$ mm	1	6
<b>Pressão inicial</b>	$P_i$ MPa	70	240
<b>Tempo delay</b>	$t_D$ seg	0,001	2,000
<b>Vazão abrasivo</b>	$\dot{m}_A$ g/min	8	72
<b>Espessura ágata</b>	$t$ mm	6	15
<b>Estratégia</b>	$est$ -	Estacionária	Agitada
<b>Tipo delay</b>	$ti_D$ -	Abrasivo antes	Água antes

A escolha do projeto do experimento mostrou-se importante nesta fase do estudo. Aplicando um projeto fatorial completo, seriam necessárias 128 amostras ( $2^7$ ). Contudo, optou-se pela execução de um experimento fatorial fracionado a 1/8 ( $2^{7-3}$ ) com um total de 16 amostras completamente aleatorizadas. A ordem de execução das amostras e os seus respectivos níveis são apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Ordem de execução dos experimentos de perfuração na etapa exploratória.

Execução	$d_S$ (mm)	$P_i$ (MPa)	$t_{Delay}$ (seg)	$\dot{m}_A$ (g/min)	$t$ (mm)	$est$	$ti_{Delay}$
1	6	70	2	10	15	Estacionária	Água antes
2	1	70	2	70	6	Agitada	Água antes
3	6	240	2	10	6	Agitada	Abrasivo antes
4	1	70	0,001	10	6	Estacionária	Abrasivo antes
5	1	70	2	10	15	Agitada	Abrasivo antes
6	1	70	0,001	70	15	Estacionária	Água antes
7	6	240	2	70	15	Agitada	Água antes
8	6	70	2	70	6	Estacionária	Abrasivo antes
9	6	240	0,001	70	6	Estacionária	Água antes
10	1	240	0,001	70	6	Agitada	Abrasivo antes
11	6	70	0,001	70	15	Agitada	Abrasivo antes
12	1	240	2	10	6	Estacionária	Água antes
13	1	240	2	70	15	Estacionária	Abrasivo antes
14	6	70	0,001	10	6	Agitada	Água antes
15	6	240	0,001	10	15	Estacionária	Abrasivo antes
16	1	240	0,001	10	15	Agitada	Água antes

Após a realização desta rodada, eliminaram-se os parâmetros com menor nível de influência, possibilitando a realização de um **grupo detalhado** de experimentos de perfuração, capaz de verificar os fatores de maior influência bem como seu comportamento. Foram utilizadas três chapas de ágata, de composição predominante de regiões microcristalinas (sem

a presença de grãos visíveis de quartzo), com 6 mm, 10,5 mm e 15 mm de espessura. A Tabela 3.6 apresenta os fatores e níveis utilizados no grupo detalhado de experimentos de perfuração.

Tabela 3.6 – Fatores e níveis utilizados no grupo detalhado de experimentos de perfuração.

Fator		Unidade	Nível baixo	Nível médio	Nível alto
Vazão abrasivo	$\dot{m}_A$	g/min	8	40	72
Espessura ágata	$t$	mm	6	10,5	15

Na etapa de experimento detalhada, fixaram-se os parâmetros não significativos. A estratégia de perfuração agitada foi utilizada para todos os experimentos (mais rápida), a pressão inicial de trabalho foi mantida em 240 MPa, o tempo de *delay* foi fixado em 1 milissegundo com a água sendo fornecida antes do abrasivo, a uma distância de afastamento da tubeira de 1 mm. Com isto, realizou-se um refinamento do modelo estatístico através de um projeto fatorial completo  $2^2$  com 4 réplicas e 3 pontos centrais, totalizando 19 corridas. A Tabela 3.7 tabela apresenta a ordem de execução das amostras e os seus respectivos níveis.

Tabela 3.7 – Ordem de execução dos experimentos de perfuração na etapa detalhada.

Execução	$t$ (mm)	$\dot{m}_A$ (g/min)	Execução	$t$ (mm)	$\dot{m}_A$ (g/min)
<b>1</b>	15	70	<b>11</b>	15	70
<b>2</b>	15	10	<b>12</b>	15	10
<b>3</b>	10,5	40	<b>13</b>	15	10
<b>4</b>	6	70	<b>14</b>	6	10
<b>5</b>	6	70	<b>15</b>	6	10
<b>6</b>	15	70	<b>16</b>	15	10
<b>7</b>	15	70	<b>17</b>	6	70
<b>8</b>	6	70	<b>18</b>	6	10
<b>9</b>	6	10	<b>19</b>	10,5	40
<b>10</b>	10,5	40			

Os experimentos de corte também foram realizados em duas etapas distintas. Primeiramente, foi realizado o **estudo preliminar** de corte, onde foram recortadas 32 amostras de ágata de duas espessuras. Neste grupo, somente foi avaliado o efeito da vazão mássica de abrasivo e da velocidade de avanço sobre a rugosidade média ( $R_a$ ) resultante no processo AWJ em ágata. Este grupo permitiu identificar que a rugosidade se comporta de maneira não linear perante a variação dos parâmetros de processo, sendo assim necessário ampliar o número de níveis e variáveis do estudo para melhor representação dos dados. A descrição completa do experimento e os resultados foram publicados no periódico *International Journal of Advanced Manufacturing Technolgy*, no artigo intitulado *Study of influence of traverse speed and abrasive mass flowrate in abrasive water jet machining of gemstones*.

A finalização da etapa de execução dos experimento foi realizada através do grupo de **experimentos de corte**, onde buscou-se ajustar as variáveis de resposta a modelos de regressão

de segunda ordem. Assim, o experimento foi realizado a partir de um planejamento composto central (CCD), que, segundo Montgomery, 2012, deriva-se do projeto fatorial  $2^k$ , sendo formado por observações nos pontos fatoriais ( $n_F$ ) e adicionando-se observações em pontos axiais ( $n_A$ ) e centrais ( $n_C$ ), sendo este o projeto mais simples e eficiente capaz de representar um modelo de segunda ordem. Uma representação esquemática de um projeto CCD é mostrado na Figura 3.17.

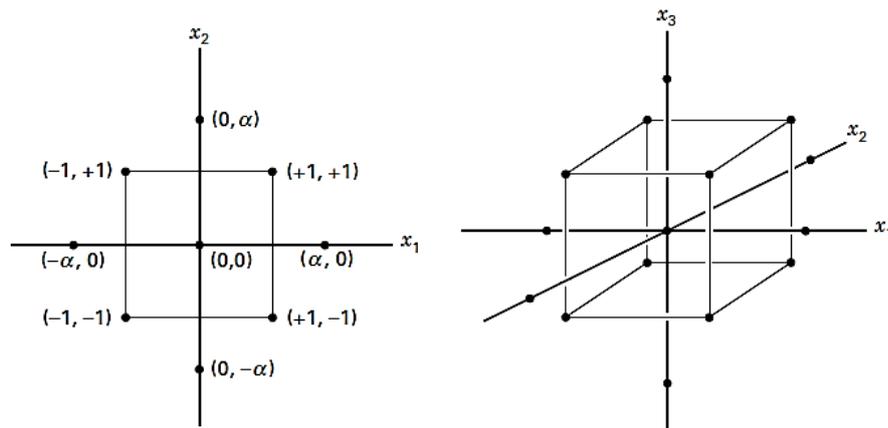


Figura 3.17 – Projetos compostos centrais para dois e três fatores. Adaptado de Montgomery, 2012.

No grupo de experimentos de corte, os fatores de estudo escolhidos são:

- $P$  - pressão de trabalho;
- $t$  - espessura do material;
- $V_f$  - velocidade de avanço;
- $\dot{m}_A$  - vazão mássica de abrasivo;
- $d_s$  - distância de afastamento da tubeira.

A partir da utilização do projeto CCD, cada variável deve possuir, pelo menos, cinco níveis (dois pontos fatoriais, dois pontos axiais e um central). Contudo, a pressão de trabalho e a espessura do material são parâmetros de difícil mudança, sendo que neste caso foram mantidos em apenas dois níveis. Isso teve como desvantagem a impossibilidade de verificação da linearidade do comportamento da pressão de trabalho e a necessidade da divisão do modelo de regressão para chapas finas e grossas. Assim, o experimento de corte foi subdividido em quatro blocos principais, sendo que os fatores e níveis utilizados são apresentados na Tabela 3.8.

De acordo com Montgomery, 2012, a ordem de execução das amostras deve ser aleatorizada para evitar erros sistemáticos e de fatores externos. Contudo, devido às condições

do equipamento utilizado no estudo, a pressão da bomba não pode ser aleatorizada, uma vez que depende exclusivamente de uma válvula que deve ser regulada manualmente, sendo difícil encontrar sempre a mesma pressão de trabalho na regulagem. Desta forma, o experimento foi realizado de forma que os cortes fossem executados primeiramente com a pressão de nível baixo e após de nível alto.

Tabela 3.8 - Fatores e níveis projetados para a realização do experimento de corte.

<b>Bloco 1 – Chapa Fina – Pressão 260 MPa</b>							
Parâmetro	Unidade		Níveis				
			Axial	Baixo	Central	Alto	Axial
Vel. Avanço	$V_f$	mm/min	100	160	250	340	400
Vazão abrasivo	$\dot{m}_A$	g/min	10	58	130	202	250
Dist. <i>afast. tub.</i>	$d_S$	mm	1	2	3,5	5	6
<b>Bloco 2 – Chapa Grossa – Pressão 260 MPa</b>							
Parâmetro	Unidade		Níveis				
			Axial	Baixo	Central	Alto	Axial
Vel. Avanço	$V_f$	mm/min	10	25	45	65	80
Vazão abrasivo	$\dot{m}_A$	g/min	10	58	130	202	250
Dist. <i>afast. tub.</i>	$d_S$	mm	1	2	3,5	5	6
<b>Bloco 3 – Chapa Fina – Pressão 340 MPa</b>							
Parâmetro	Unidade		Níveis				
			Axial	Baixo	Central	Alto	Axial
Vel. Avanço	$V_f$	mm/min	100	160	250	340	400
Vazão abrasivo	$\dot{m}_A$	g/min	10	58	130	202	250
Dist. <i>afast. tub.</i>	$d_S$	mm	1	2	3,5	5	6
<b>Bloco 4 – Chapa Grossa – Pressão 340 MPa</b>							
Parâmetro	Unidade		Níveis				
			Axial	Baixo	Central	Alto	Axial
Vel. Avanço	$V_f$	mm/min	10	25	45	65	80
Vazão abrasivo	$\dot{m}_A$	g/min	10	58	130	202	250
Dist. <i>afast. tub.</i>	$d_S$	mm	1	2	3,5	5	6

Assim, para cada bloco de experimentos foram usados três fatores: velocidade de avanço ( $V_f$ ), vazão mássica de abrasivo ( $\dot{m}_A$ ) e distância de afastamento da tubeira ( $d_S$ ). Assim, são oito pontos fatoriais ( $2^3$ ), seis pontos axiais ( $2 \times 3$ ) e seis pontos centrais, totalizando 20 cortes para cada bloco. Nesta configuração não se faz necessário o uso de réplicas, uma vez que o erro experimental é avaliado em torno do ponto central. Tendo ao todo quatro blocos, foram executados um total de 80 cortes para a execução completa do experimento.

Os cortes foram lineares com comprimento de 30 mm, o que permitiu área suficiente para a realização da medição da rugosidade, largura de fenda e desvio de perpendicularidade. A ordem de execução dos experimentos de corte é apresentada na Tabela 3.9.

### 3.6 Definição do modelos de regressão e análise dos dados

A partir da execução dos experimentos, realizou-se a coleta e o tratamento dos dados relativos à qualidade de percepção visual, largura de fenda, desvio de perpendicularidade, rugosidade e tempo de perfuração.

Tabela 3.9 – Ordem de execução dos experimentos de corte.

Bloco 1 - Pressão 260 MPa Chapa Fina				Bloco 2 - Pressão 260 MPa Chapa Grossa				Bloco 3 - Pressão 340 MPa Chapa Fina				Bloco 4 - Pressão 340 MPa Chapa Grossa			
Ordem	$V_f$	$\dot{m}_A$	$d_S$	Ordem	$V_f$	$\dot{m}_A$	$d_S$	Ordem	$V_f$	$\dot{m}_A$	$d_S$	Ordem	$V_f$	$\dot{m}_A$	$d_S$
1	250	10	3,5	21	28	58	2	41	250	130	3,5	61	55	250	3,5
2	250	130	3,5	22	55	130	3,5	42	160	200	5	62	82	200	2
3	340	200	2	23	100	130	3,5	43	250	130	3,5	63	55	130	3,5
4	250	130	1	24	55	10	3,5	44	160	58	2	64	55	10	3,5
5	250	130	3,5	25	10	130	3,5	45	340	58	2	65	55	130	3,5
6	160	58	5	26	55	130	3,5	46	250	130	3,5	66	100	130	3,5
7	160	200	2	27	55	130	3,5	47	250	130	3,5	67	28	58	5
8	160	200	5	28	82	58	5	48	400	130	3,5	68	82	58	5
9	250	130	3,5	29	55	130	1	49	340	58	5	69	28	200	5
10	250	130	3,5	30	55	250	3,5	50	250	250	3,5	70	55	130	3,5
11	250	250	3,5	31	55	130	3,5	51	250	130	6	71	82	58	2
12	100	130	3,5	32	55	130	3,5	52	160	200	2	72	28	200	2
13	250	130	3,5	33	55	130	3,5	53	100	130	3,5	73	55	130	3,5
14	400	130	3,5	34	28	58	5	54	160	58	5	74	55	130	3,5
15	340	58	2	35	82	200	2	55	250	130	3,5	75	28	58	2
16	250	130	3,5	36	28	200	5	56	340	200	5	76	55	130	1
17	340	200	5	37	55	130	6	57	250	10	3,5	77	55	130	3,5
18	340	58	5	38	82	58	2	58	340	200	2	78	82	200	5
19	250	130	6	39	82	200	5	59	250	130	1	79	55	130	6
20	160	58	2	40	28	200	2	60	250	130	3,5	80	10	130	3,5

Os dados coletados foram tratados estatisticamente para realizar a determinação do nível de significância de cada variável de entrada nas diferentes respostas. Para isso, utilizou-se a técnica de análise de variância (ANOVA) com confiabilidade global de 95%. A ANOVA consiste no particionamento da variabilidade total dos dados na variabilidade de cada um dos componentes, com o objetivo de verificar a fonte de variação [Montgomery, 2012]. Estatisticamente, um conjunto de dados pode ser representado pelo modelo de efeitos de primeira ou segunda ordem, representados nas Equações 3.2 e 3.3, respectivamente.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \epsilon \quad (3.2)$$

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (3.3)$$

Onde:

- $y$  – variável de resposta;
- $\beta_0$  – média geral de representação do experimento;
- $\beta_i, \beta_{ii}$  e  $\beta_{ij}$  – efeitos dos diferentes parâmetros de processo;
- $x_i, x_{ii}, x_j$  - parâmetros de processo investigados.

O teste realizado pela análise de variância indica a probabilidade para que as médias dos dados observados sejam iguais ou diferentes, ou seja, se existe efeito significativo do parâmetro observado ou não. A hipótese nula ( $H_0$ ) indica que não há diferença significativa entre as médias dos fatores observados, e a hipótese alternativa ( $H_1$ ) indica que há diferença entre quaisquer par de médias analisadas. O parâmetro mais utilizado dentro da tabela ANOVA para realizar esta afirmação é o *valor-P*, que corresponde a probabilidade de estar errado ao rejeitar a hipótese nula quando ela for de fato verdadeira. Assim, assume-se uma margem de erro (geralmente 5%) e procede-se a análise através da comparação do valor-P resultante com a margem de erro. Caso este valor seja inferior a margem de erro, rejeita-se a hipótese nula e considera-se que há diferença entre as médias, ou seja, existe efeito estatisticamente significativo do fator analisado sobre a variável de resposta.

O coeficiente de determinação  $R^2$  é popularmente utilizado para averiguar a adequação de um modelo de regressão. Em geral, este coeficiente demonstra o quanto da variável de resposta pode ser explicado ser explicado pelas variáveis de entrada do modelo de regressão [Hines, et al., 2011]. Isto significa que, para um  $R^2$  de 0,90; 90% dos da variabilidade dos dados são explicadas devido às variáveis de entrada utilizadas no experimento, e os 10% restantes oriundos dos fatores de ruído e erro aleatório. Muitos trabalhos na literatura abordam sobre os níveis adequados para os valores de  $R^2$ , sendo que o consenso geral é de que este parâmetro deve ser utilizado com cuidado e que nem sempre altos valores representam bons modelos de regressão.

Os materiais, equipamentos e métodos apresentados neste capítulo permitiram realizar todo o desenvolvimento da pesquisa e desenvolver as conclusões sobre o comportamento do processo AWJ mediante a variação dos diferentes parâmetros de processo. Estes efeitos são apresentados e discutidos no capítulo 4.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos durante o desenvolvimento do trabalho. Inicialmente, apresentam-se os dados obtidos durante a realização dos experimentos, seguidos pelas análises estatísticas, onde foi possível identificar a influência de cada parâmetro de processo sobre as variáveis de resposta. A partir destas análises foi possível obter modelos de regressão que permitem prever os diferentes parâmetros investigados. O capítulo finaliza com a apresentação de uma implementação computacional para utilização dos resultados obtidos a partir da realização deste trabalho.

### 4.1 Estudo preliminar sobre corte via AWJ em ágata

Um estudo preliminar foi desenvolvido para verificar a viabilidade de realização da pesquisa, tendo como objetivo avaliar a influência da velocidade de avanço e vazão mássica de abrasivo sobre a rugosidade média e ângulo das marcas de estrias geradas pelo processo AWJ. Para tanto, foram recortadas 32 amostras de ágata (estudo preliminar de corte, Figura 3.16). O estudo foi publicado [Lima, et al., 2016] A Figura 4.1 apresenta, de maneira resumida, um gráfico sobre a rugosidade média  $R_a$  obtida ao longo da profundidade nas amostras do estudo preliminar.

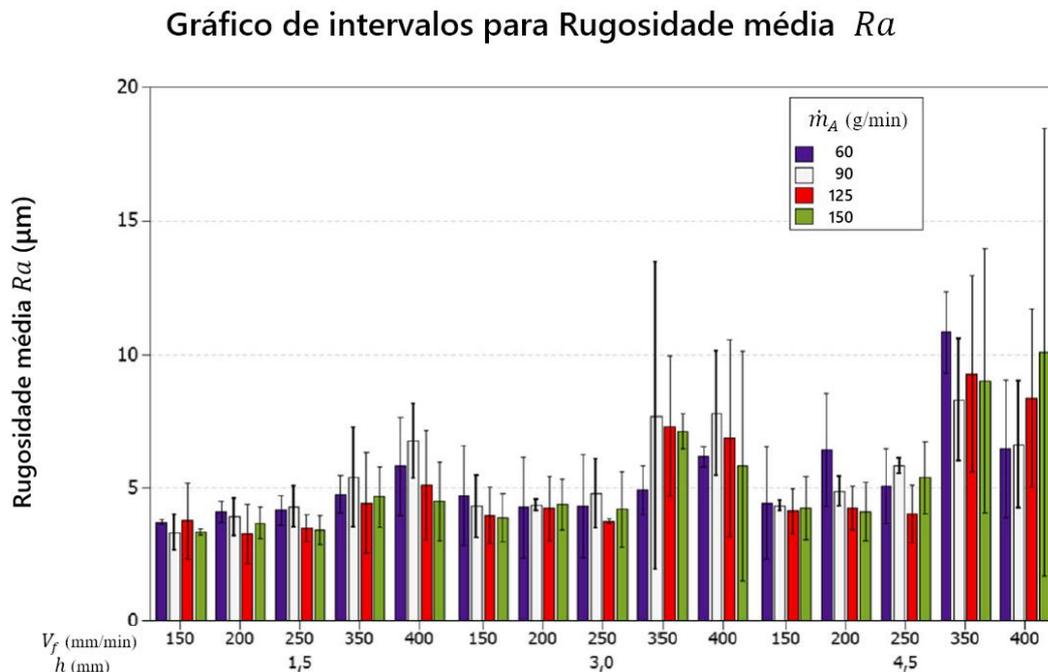


Figura 4.1 – Rugosidade média  $R_a$  medida nos ensaios preliminares. Adaptado de Lima, et al., 2016.

Verifica-se na Figura 4.1 que a variação nos parâmetros estudados possui grande influência sobre a rugosidade da peça, sendo que velocidades de avanço maiores tendem a ter maior rugosidade. No estudo preliminar, chapas finas e grossas de ágata foram analisadas; observou-se que a variação dos parâmetros de processo (velocidade de avanço -  $V_f$  e vazão mássica de abrasivo -  $\dot{m}_A$ ) possuem efeitos estatisticamente significativos sobre a rugosidade e sobre o ângulo das marcas de estrias gerados na superfície cortada por AWJ. Comprovou-se também a hipótese inicial de que a rugosidade sempre se eleva ao longo da profundidade de corte, sendo que a velocidade de avanço mostrou ter maior efeito sobre a variação nos resultados que a vazão mássica de abrasivo. Além disso, para profundidades de corte a partir de 3 mm, a vazão mássica de abrasivo não se mostrou mais estatisticamente significativa; a variação era explicada somente pela velocidade de avanço e pelo erro aleatório.

Neste sentido, a inclusão de outras variáveis do processo nas análises, como a pressão de trabalho ( $P$ ) e a distância de afastamento da tubeira ( $d_s$ ), mostrou-se necessária para permitir uma melhor compreensão sobre a qualidade global do processo, bem como possibilitar o desenvolvimento de um método prático de avaliação da qualidade e determinação dos parâmetros de processo mais indicados para usinagem em ágata. Assim, deu-se seguimento ao trabalho através do planejamento e execução de novas rodadas de experimentos.

## 4.2 Experimento de perfuração

O experimento de perfuração foi subdividido em dois grupos (exploratório e detalhado - Figura 3.16). A Tabela 4.1 apresenta o tempo de perfuração medido ( $t_{perf}$ ), de acordo com o procedimento descrito na seção 3.3.5, na rodada exploratória de experimentos. Com base nestes dados, foi realizada uma análise de variância (ANOVA - Tabela 4.2) que permitiu identificar os parâmetros de processo com maior efeito sobre o tempo de perfuração. A Figura 4.2 apresenta o gráfico de efeitos principais com relação ao tempo de perfuração.

Tabela 4.1 - Dados coletados sobre o tempo de perfuração – rodada exploratória.

Ordem Padrão	$d_s$ (mm)	Pi (MPa)	$t_{Delay}$ (seg)	$\dot{m}_A$ (g/min)	$t$ (mm)	est	$ti_{Delay}$	$t_{Perf}$ (seg)
1	1	70	0,001	10	6	Estacionária	Abrasivo antes	14,80
2	6	70	0,001	10	6	Agitada	Água antes	5,27
3	1	240	0,001	10	15	Agitada	Água antes	22,38
4	6	240	0,001	10	15	Estacionária	Abrasivo antes	27,27
5	1	70	2	10	15	Agitada	Abrasivo antes	17,47
6	6	70	2	10	15	Estacionária	Água antes	28,16
7	1	240	2	10	6	Estacionária	Água antes	8,20
8	6	240	2	10	6	Agitada	Abrasivo antes	4,07
9	1	70	0,001	70	15	Estacionária	Água antes	17,36
10	6	70	0,001	70	15	Agitada	Abrasivo antes	9,20
11	1	240	0,001	70	6	Agitada	Abrasivo antes	1,80
12	6	240	0,001	70	6	Estacionária	Água antes	3,20
13	1	70	2	70	6	Agitada	Água antes	4,57
14	6	70	2	70	6	Estacionária	Abrasivo antes	12,27
15	1	240	2	70	15	Estacionária	Abrasivo antes	25,96
16	6	240	2	70	15	Agitada	Água antes	10,37

Através da ANOVA (Tabela 4.2) e do gráfico de efeitos principais (Figura 4.2) é possível verificar que o fator que possui maior efeito sobre o tempo de perfuração é a espessura ( $t$ ) da peça a ser cortada.

Tabela 4.2 - Análise de variância para o tempo de perfuração do processo AWJ em ágata – etapa exploratória.

Fonte	GL	SQ	QM	Valor F	Valor-P
Modelo	7	1281,73	183,104	5,05	0,018
Linear	7	1281,73	183,104	5,05	0,018
$d_s$	1	33,12	33,120	0,91	0,367
Pi	1	0,77	0,766	0,02	0,888
$t_{Delay}$	1	3,59	3,591	0,10	0,761
$\dot{m}_A$	1	145,44	145,444	4,01	0,080
$t$	1	863,77	863,772	23,80	0,001
est	1	231,19	231,192	6,37	0,036
$ti_{Delay}$	1	3,84	3,842	0,11	0,753
Erro	8	290,32	36,290		
Total	15	1572,05			

A análise ainda permite identificar que a estratégia de perfuração (est) possui uma grande influência no tempo total de perfuração, sendo que a estratégia agitada produz, em média, uma perfuração 54% mais rápida que a estratégia estacionária. A vazão mássica de abrasivo ( $\dot{m}_A$ ) também possui efeito pronunciado sobre o tempo total de perfuração, sendo que maiores quantidades de abrasivo produzem uma perfuração mais rápida do que o uso de menor vazão, o que pode ser explicado pelo fato de quanto mais abrasivo é utilizado maior é o número

de arestas cortantes ao mesmo tempo e o corte será realizado mais rapidamente. Os fatores que apresentaram menor efeito são a distância de afastamento da tubeira ( $d_s$ ), pressão inicial ( $P_i$ ), tipo ( $t_{i_{Delay}}$ ) e tempo de *delay* ( $t_{Delay}$ ).

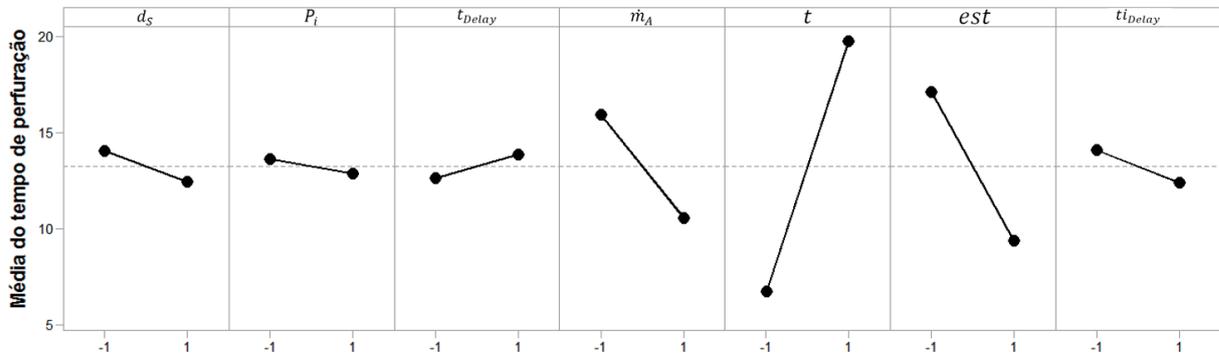


Figura 4.2 – Gráfico de efeitos principais o tempo de perfuração via AWJ em ágata – etapa exploratória.

Com isso, optou-se pelo refinamento do estudo através de um novo grupo de experimentos de perfuração (rodada detalhada, Figura 3.16) onde buscou-se investigar somente o efeito da espessura do material e da vazão mássica de abrasivo sobre o tempo de perfuração, utilizando a estratégia de perfuração agitada (de menor tempo). Os demais parâmetros foram mantidos constantes: a pressão inicial foi mantida em seu nível alto (240 MPa), o tempo de *delay* em 1 milissegundo, com a água sendo disparada primeiro e com 6 milímetros de afastamento da tubeira. Os dados referentes ao tempo de perfuração obtidos nos experimentos da rodada detalhada são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Dados coletados sobre o tempo de perfuração – rodada detalhada para perfuração dinâmica.

Espessura (mm)	$\dot{m}_A$ (g/min)	tPerf (seg)				Média	DP
		Rep 1	Rep 2	Rep 3	Rep 4		
6	10	2,25	5,27	2,9	4,07	3,62	1,33
6	70	1,37	2,77	1,8	2,15	2,02	0,59
15	10	12,87	11,08	10,85	9,21	11,00	1,50
15	70	7,99	10,37	8,18	9,2	8,94	1,09
10,5	40	2,28	3,27	2,9	-	2,82	0,50

A partir dos dados coletados na etapa detalhada de experimentos, efetuou-se a ANOVA apresentada na Tabela 4.4. O coeficiente de determinação  $R^2$  da análise foi de 85%.

Tabela 4.4 - Análise de variância para o tempo de perfuração do processo AWJ em ágata – etapa detalhada.

Fonte	GL	SQ	QM	Valor F	Valor-P
Modelo	4	302,063	75,516	21,04	0,000
Linear	2	261,679	130,840	36,46	0,000
$t$	1	238,471	238,471	66,45	0,000
$\dot{m}_A$	1	23,208	23,208	6,47	0,023
Interações	1	2,616	2,616	0,73	0,408
$t * \dot{m}_A$	1	2,616	2,616	0,73	0,408
Curvatura	1	37,767	37,767	10,52	0,006
Erro	14	50,244	3,589		
Total	18	352,307			

A análise de variância apresentada na Tabela 4.4 confirma o que foi identificado na análise exploratória, indicando que ambos os fatores, espessura ( $t$ ) e vazão máxima de abrasivo ( $\dot{m}_A$ ), possuem efeito estatisticamente significativo sobre o tempo de perfuração. A análise ainda indica que a interação entre os fatores não é significativa. A Figura 4.3 apresenta o gráfico de efeitos principais e de interações para a análise realizada.

Efeitos principais para tempo de perfuração  $t_{perf}$

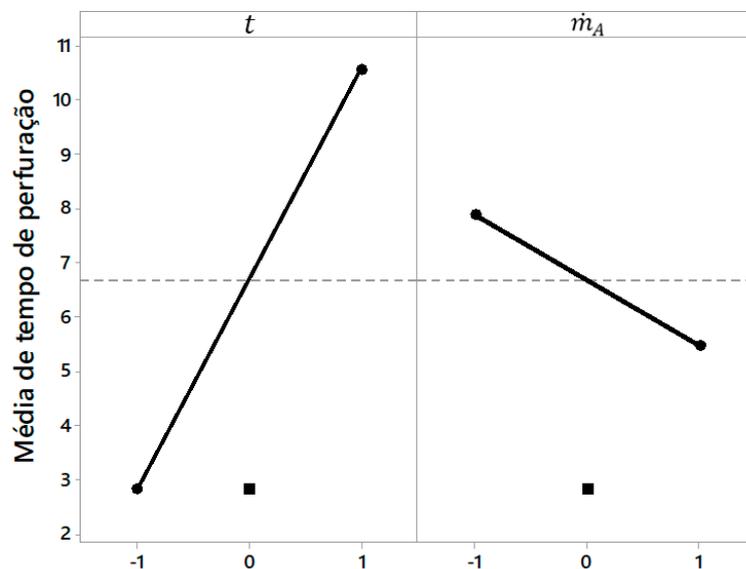


Figura 4.3 – Gráficos de efeitos principais para o tempo de perfuração - etapa detalhada.

Como é possível observar na Figura 4.3, a espessura da peça possui o maior efeito para o tempo de perfuração, sendo que quanto maior for a espessura da peça, maior será o tempo necessário para perfuração. O comportamento inverso ocorre para vazão de abrasivo, sendo que quanto maior for a vazão, menor será o tempo de perfuração.

A Equação 4.1 apresenta o modelo de regressão para predição do tempo de perfuração pelo processo AWJ em chapas de ágata, utilizado para construir o gráfico de colunas da Figura

4.4, que permite analisar mais detalhadamente os efeitos de cada parâmetro de entrada sobre o tempo de perfuração.

$$t_{Perf} = 6,68 + 3,86 t - 1,20 \dot{m}_A - 0,40 t \dot{m}_A \quad (4.1)$$

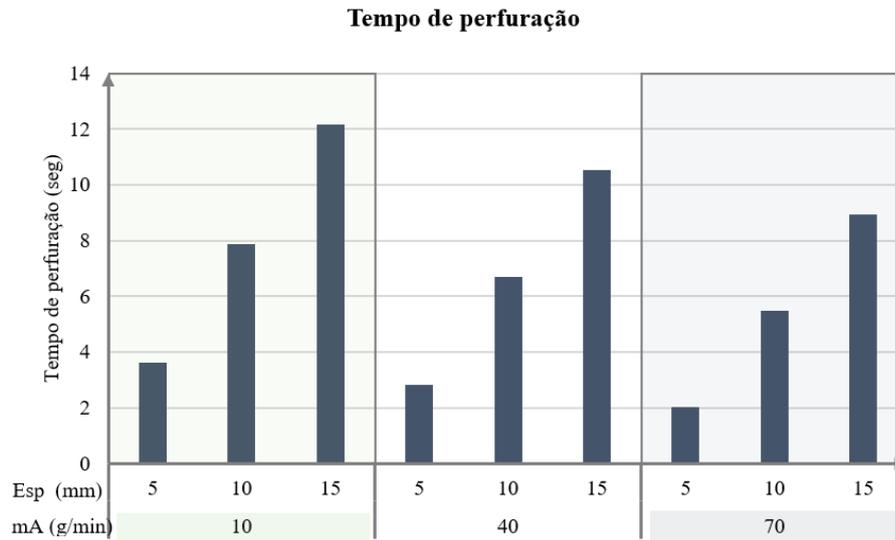


Figura 4.4 - Comportamento do modelo de predição do tempo de perfuração em chapas de ágata pelo processo AWJ.

Através da análise da Figura 4.4, nota-se a influência da espessura da peça a ser perfurada e da vazão mássica de abrasivo sobre o tempo de perfuração, onde o aumento da espessura e a redução da vazão mássica ocasionam um aumento no tempo de perfuração do processo AWJ em chapas de ágata.

### 4.3 Experimento de corte

A partir da realização dos experimentos de corte foi possível obter os resultados referentes a espessura das peças ( $t$ ), rugosidade ( $Ra$ ), altura da zona suavizada ( $hs$ ), qualidade de percepção visual ( $Qv$ ), largura de fenda ( $k_w$ ) e desvio de perpendicularidade ( $u$ ). As seções a seguir apresentam os resultados coletados para cada variável de resposta desejada.

#### 4.3.1 Espessura das peças do experimento de corte

O conjunto de experimentos de corte possibilitou o levantamento das variáveis de resposta investigadas neste trabalho. Primeiramente, realizou-se a medição da espessura média dos grupos de chapas de ágata utilizadas no experimento (chapa fina e chapa grossa). A Figura

4.5 apresenta um comparativo entre a espessura média encontrada nas amostras de chapas fina (5,29 mm) e grossa (13,76 mm), bem como o desvio padrão das espessuras em ambos os grupos.

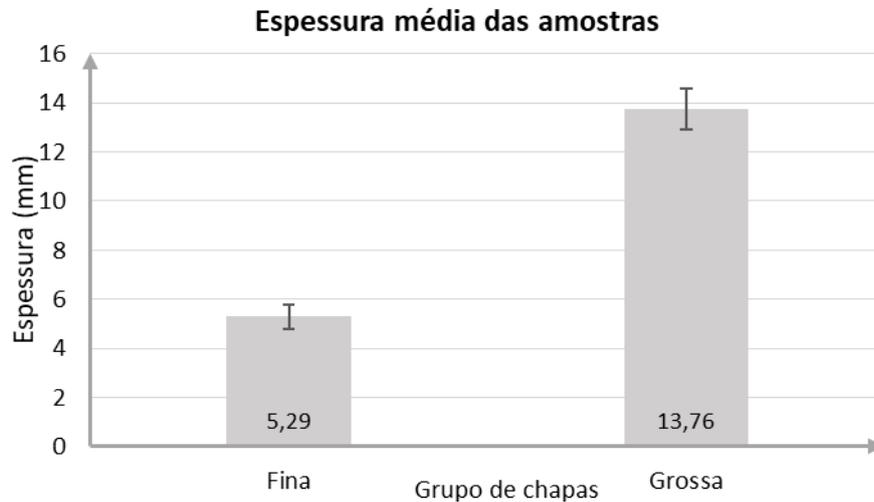


Figura 4.5 – Espessura média das amostras utilizadas nos experimentos.

A variação observada na espessura das amostras de chapas finas e grossas pode ser explicada pelo processamento do material para sua transformação em chapas, onde se utilizam máquinas de baixa robustez e confiabilidade mecânica. Observa-se que não há um controle preciso sobre a espessura na etapa de corte das chapas, sendo que em algumas peças verificam-se desvios de paralelismo entre as faces principais que causam variação na espessura de até 1 mm em chapas grossas.

### 4.3.2 Rugosidade

Todas as amostras foram submetidas à medição da rugosidade, de acordo com o procedimento apresentado na seção 3.3.2. O equipamento utilizado permitiu obter, além dos valores de rugosidade no parâmetro  $Ra$  e o perfil da superfície para cada medição. A Figura 4.6 apresenta um comparativo de alguns perfis de rugosidade coletados no topo e fundo da superfície usinada via AWJ. A relação completa de perfis construídos pode ser visualizada no Apêndice A e os valores de rugosidade medidos em todas as amostras e profundidades são apresentados no Apêndice B.

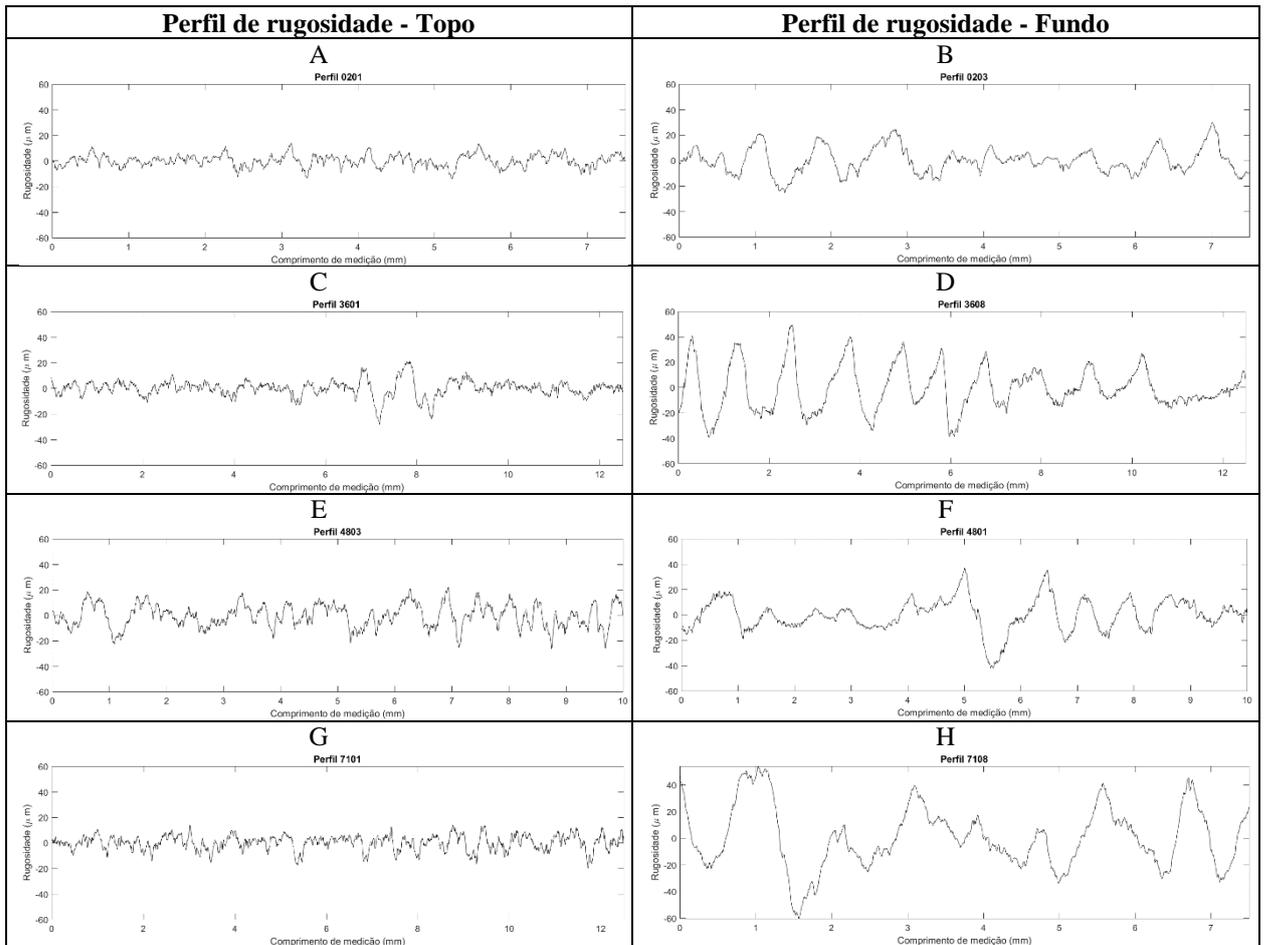


Figura 4.6 – Perfis de rugosidade coletadas no topo e fundo da superfície usinada via AWJ. Em A) topo da amostra 02 com rugosidade  $R_a$  3,693  $\mu\text{m}$ ; em B) fundo da amostra 02 com rugosidade  $R_a$  7,899  $\mu\text{m}$ ; em C) topo da amostra 36 com rugosidade  $R_a$  4,438  $\mu\text{m}$ ; em D) fundo da amostra 36 com rugosidade  $R_a$  14,150  $\mu\text{m}$ ; em E) topo da amostra 48 com rugosidade  $R_a$  7,567  $\mu\text{m}$ ; em F) fundo da amostra 48 com rugosidade  $R_a$  9,667  $\mu\text{m}$ ; em G) topo da amostra 71 com rugosidade  $R_a$  4,566  $\mu\text{m}$ ; em H) fundo da amostra 71 com rugosidade  $R_a$  18,770  $\mu\text{m}$ .

A partir da avaliação dos perfis e valores de rugosidade coletados, percebe-se que a rugosidade medida no topo da superfície sempre foi menor que a medida no fundo da superfície, para ambos os parâmetros utilizados. Este comportamento foi praticamente idêntico em todas as amostras, variando apenas em superfícies que não apresentam a região de zona ondulada. Nas medições realizadas no topo das amostras, o perfil de rugosidade se apresenta com formato regular e amplitude praticamente constante por toda a superfície de medição. Já para as medições realizadas no fundo das superfícies, percebe-se claramente a existência das estrias formadas pelos padrões de picos e vales dos perfis.

### 4.3.3 Altura da zona suavizada

Um dos parâmetros mais importantes para a realização deste estudo, a medição da altura da zona suavizada, foi realizada a partir do procedimento apresentado na seção 3.3.3. A Tabela 4.5 apresenta os valores, em termos percentuais, da altura da zona suavizada em relação à espessura total de todas as amostras determinadas pelo autor do trabalho. O Apêndice C apresenta a relação completa das imagens utilizadas para a medição da altura da zona suavizada.

Tabela 4.5 – Altura percentual da zona suavizada.

<b>Amostra</b>	<b><math>h_s</math> (%)</b>						
<b>1</b>	23,54	<b>21</b>	60,43	<b>41</b>	93,36	<b>61</b>	83,54
<b>2</b>	48,86	<b>22</b>	41,09	<b>42</b>	100,00	<b>62</b>	66,43
<b>3</b>	26,68	<b>23</b>	25,39	<b>43</b>	74,92	<b>63</b>	88,54
<b>4</b>	36,72	<b>24</b>	29,86	<b>44</b>	64,64	<b>64</b>	51,48
<b>5</b>	44,12	<b>25</b>	100,00	<b>45</b>	50,76	<b>65</b>	74,77
<b>6</b>	77,91	<b>26</b>	63,19	<b>46</b>	81,46	<b>66</b>	63,19
<b>7</b>	64,63	<b>27</b>	65,13	<b>47</b>	77,56	<b>67</b>	100,00
<b>8</b>	93,93	<b>28</b>	60,40	<b>48</b>	64,29	<b>68</b>	42,50
<b>9</b>	41,78	<b>29</b>	24,35	<b>49</b>	55,41	<b>69</b>	64,46
<b>10</b>	56,98	<b>30</b>	29,59	<b>50</b>	75,70	<b>70</b>	74,97
<b>11</b>	33,62	<b>31</b>	26,35	<b>51</b>	100,00	<b>71</b>	37,90
<b>12</b>	100,00	<b>32</b>	26,50	<b>52</b>	91,32	<b>72</b>	61,69
<b>13</b>	54,38	<b>33</b>	31,04	<b>53</b>	100,00	<b>73</b>	76,55
<b>14</b>	59,81	<b>34</b>	44,07	<b>54</b>	84,76	<b>74</b>	46,08
<b>15</b>	50,51	<b>35</b>	19,52	<b>55</b>	62,86	<b>75</b>	60,27
<b>16</b>	50,76	<b>36</b>	30,18	<b>56</b>	50,10	<b>76</b>	47,23
<b>17</b>	26,94	<b>37</b>	11,47	<b>57</b>	21,56	<b>77</b>	45,54
<b>18</b>	58,74	<b>38</b>	51,74	<b>58</b>	41,22	<b>78</b>	63,05
<b>19</b>	64,29	<b>39</b>	25,17	<b>59</b>	47,41	<b>79</b>	87,99
<b>20</b>	56,76	<b>40</b>	31,65	<b>60</b>	75,93	<b>80</b>	100,00

A fim de reduzir o grau de subjetividade da análise, o processo de medição da altura da zona suavizada foi repetido por cinco operadores em dez amostras. Uma comparação entre os valores obtidos na medição da altura da zona suavizada por cada um dos cinco operadores, em termos percentuais da espessura total da amostra, pode ser visualizada na Figura 4.7.

A partir da análise da Figura 4.7 é possível verificar que diferentes operadores, sob diferentes níveis de conhecimento do processo, possuem um nível semelhante de percepção na diferenciação das zonas suavizadas e onduladas de superfícies de ágata cortadas via AWJ. O maior desvio padrão das observações foi de 0,63 mm para a amostra 11 (10,92%), e a variação absoluta máxima, também para a amostra 11, de 1,45 mm. Com base nestes dados, verifica-se que é possível determinar, com um nível de confiabilidade aceitável, a altura da zona suavizada de uma superfície cortada via AWJ em ágata de maneira visual.

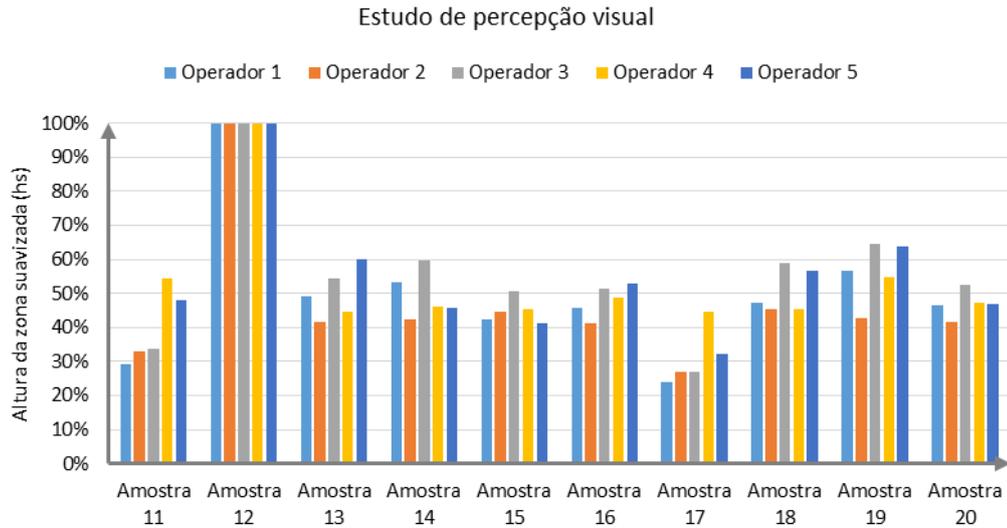


Figura 4.7 – Gráfico comparativo sobre a percepção de diferentes operadores para a medição da altura da zona suavizada em dez amostras de ágata recortadas via AWJ.

Adicionalmente, realizou-se um estudos visando determinar a rugosidade existente na transição entre as zonas suave e ondulada. Como a rugosidade foi medida em intervalos de 1,5 mm, efetuou-se a estimativa de seu valor na área de transição através de interpolação linear. Inicialmente, efetuou-se a estimativa com base nos valores de altura suavizada obtidos pelo autor em todas as amostras do experimento de corte. A Tabela 4.6 apresenta a rugosidade na área de transição suave/ondulada das amostras.

Tabela 4.6 – Rugosidade  $Ra$  na transição entre as zonas suave e ondulada da superfície usinada via AWJ.

Amostra	$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )						
1	6,76	21	4,16	41	4,61	61	7,06
2	4,51	22	3,83	42	4,84	62	5,15
3	3,81	23	6,96	43	5,97	63	7,29
4	4,79	24	8,24	44	5,96	64	10,03
5	4,11	25	3,23	45	4,78	65	6,25
6	9,08	26	6,92	46	4,74	66	5,02
7	5,52	27	5,61	47	4,95	67	5,08
8	4,56	28	9,11	48	5,86	68	5,02
9	4,38	29	3,93	49	5,07	69	4,89
10	7,44	30	5,78	50	5,07	70	7,23
11	5,92	31	5,77	51	5,82	71	5,53
12	4,68	32	5,63	52	5,08	72	4,31
13	4,09	33	6,33	53	2,72	73	10,54
14	5,42	34	5,35	54	9,56	74	4,14
15	5,16	35	3,49	55	5,12	75	4,29
16	6,15	36	4,93	56	4,62	76	4,37
17	5,49	37	8,56	57	5,93	77	5,10
18	7,48	38	16,16	58	4,55	78	5,39
19	5,19	39	13,33	59	2,87	79	5,10
20	5,72	40	4,68	60	4,49	80	2,49

O valor médio da rugosidade  $Ra$  estimada na interface entre a zona suavizada e ondulada tomando por base os dados de altura suavizada medidos pelo autor foi de  $5,75 \mu\text{m}$ , com desvio padrão de  $2,17 \mu\text{m}$ . A Figura 4.8 apresenta as médias calculadas por bloco do experimento (conforme Tabela 3.8), bem como o desvio padrão associado a cada grupo de amostras.

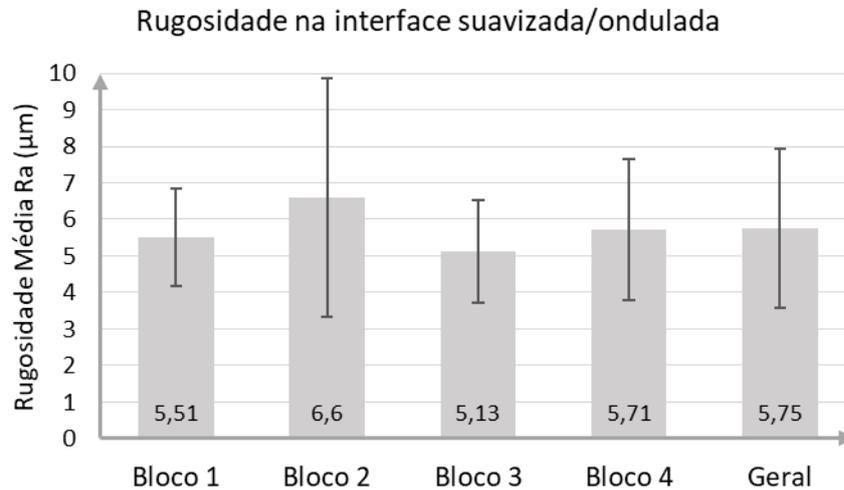


Figura 4.8 – Rugosidade  $Ra$  média estimada na área de transição suave/ondulada.

Posteriormente, verificou-se a rugosidade na área de transição tomando por base os dados de altura da zona suavizada dos demais operadores. A Tabela 4.7 apresenta os dados, estimados via interpolação linear, da rugosidade para as amostras 11 a 20 para os cinco operadores.

Tabela 4.7 – Rugosidade média  $Ra$  na área de transição estimada por diferentes operadores em 10 amostras de ágata cortadas via AWJ.

Amostra	Operador 1	Operador 2	Operador 3	Operador 4	Operador 5	Média	DP
11	6,13	5,95	5,92	5,25	5,24	5,70	0,42
12	4,68	4,68	4,68	4,68	4,68	4,68	0,00
13	3,90	4,00	4,09	3,96	4,35	4,06	0,18
14	5,13	4,86	5,42	4,91	4,91	5,05	0,23
15	4,97	5,00	5,16	5,02	4,94	5,02	0,08
16	6,03	6,00	6,21	6,05	6,39	6,14	0,16
17	5,49	5,49	5,49	5,49	5,49	5,49	0,00
18	7,01	7,06	7,48	7,06	7,34	7,19	0,21
19	4,94	4,70	5,19	4,89	5,18	4,98	0,21
20	5,06	4,94	5,36	5,08	5,07	5,10	0,15

A partir dos dados apresentados na Tabela 4.7, foi possível construir o gráfico de colunas da Figura 4.9, que mostra, de maneira resumida, a rugosidade na área de transição entre as zonas suavizada e ondulada nas amostras 11 a 20 avaliadas por diferentes operadores. A média da

rugosidade na interface obtida entre todos os operadores foi de  $5,34 \mu\text{m}$ , com desvio padrão de  $0,84 \mu\text{m}$ .

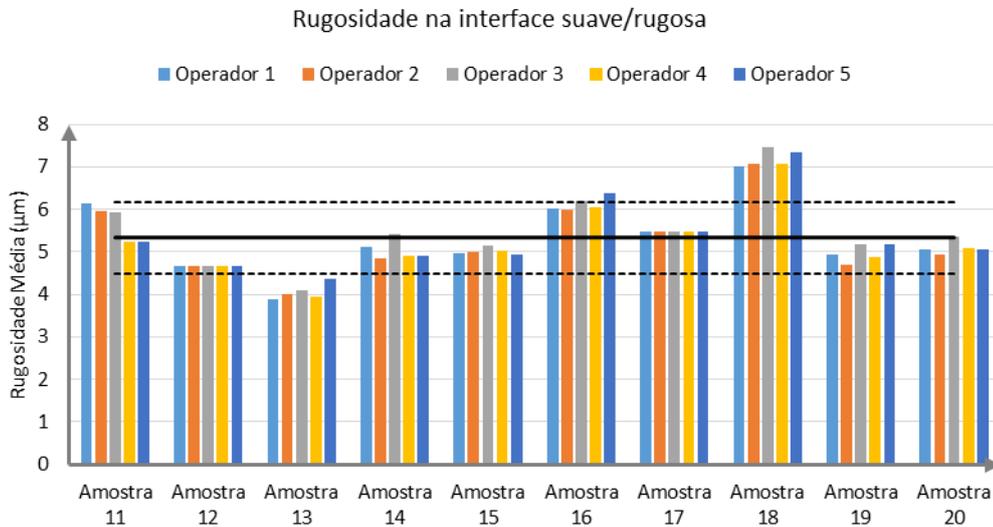


Figura 4.9 – Comparativo entre a rugosidade média  $R_a$  na área de transição estimada por diferentes operadores em 10 amostras de ágata cortadas via AWJ.

É possível identificar na Figura 4.9 que a rugosidade  $R_a$  estimada por todos os operadores na área de transição entre as zonas suavizada e ondulada situa-se entre os intervalos de 4 a  $7,5 \mu\text{m}$ . A linha horizontal representa a média geral de todas as observações ( $5,34 \mu\text{m}$ ) e as linhas tracejadas representam os limites de um desvio padrão acima ( $6,18 \mu\text{m}$ ) e um desvio padrão abaixo ( $4,50 \mu\text{m}$ ) da média geral. Dada a semelhança entre as observações para os diferentes operadores e manutenção de um padrão razoavelmente constante, é possível afirmar que a abordagem de separação visual entre as zonas suavizada e ondulada é válida e confiável.

Neste sentido, considerando que a interface entre a zona suavizada e a zona ondulada é perceptível visualmente, pode-se dizer que a rugosidade neste ponto tem magnitude entre 4 a  $7,5 \mu\text{m}$ . De acordo com a ABNT - NBR 8404/84, a classe de qualidade de acabamento superficial N9 possui rugosidade  $R_a$  máxima de  $6,3 \mu\text{m}$ , e a classe N10, de no máximo  $12,5 \mu\text{m}$ . Assim, a zona suavizada possui qualidade N9 ou menor, e a zona ondulada possui qualidade N10 ou maior; desta forma, o valor de rugosidade média  $R_a$  de  $6,3 \mu\text{m}$  é estabelecido como **limite da rugosidade na zona suavizada**.

#### 4.3.4 Qualidade de percepção visual

Baseando-se no limite da rugosidade  $R_a$  para a zona suavizada estabelecido na seção anterior, foi corrigida, com base em um limite numérico, a magnitude da altura da zona

suavizada em todas as amostras do experimento de corte, bem como efetuar o cálculo do critério de qualidade de percepção visual  $Q_v$  (equação 3.1). A Tabela 4.8 apresenta a qualidade  $Q_v$  calculada para as amostras do experimento de corte.

Tabela 4.8 – Nível de qualidade de percepção visual  $Q_v$ .

<b>Amostra</b>	<b><math>Q_v</math> (%)</b>						
<b>1</b>	23,54	<b>21</b>	87,35	<b>41</b>	100,00	<b>61</b>	91,02
<b>2</b>	76,25	<b>22</b>	75,38	<b>42</b>	100,00	<b>62</b>	87,59
<b>3</b>	58,49	<b>23</b>	9,46	<b>43</b>	83,35	<b>63</b>	90,21
<b>4</b>	63,82	<b>24</b>	19,90	<b>44</b>	73,11	<b>64</b>	43,09
<b>5</b>	100,00	<b>25</b>	100,00	<b>45</b>	62,94	<b>65</b>	85,96
<b>6</b>	56,94	<b>26</b>	67,16	<b>46</b>	50,65	<b>66</b>	86,84
<b>7</b>	87,51	<b>27</b>	81,76	<b>47</b>	100,00	<b>67</b>	100,00
<b>8</b>	100,00	<b>28</b>	44,01	<b>48</b>	68,43	<b>68</b>	74,00
<b>9</b>	91,68	<b>29</b>	38,39	<b>49</b>	67,20	<b>69</b>	100,00
<b>10</b>	54,13	<b>30</b>	42,51	<b>50</b>	75,70	<b>70</b>	71,05
<b>11</b>	98,53	<b>31</b>	52,06	<b>51</b>	100,00	<b>71</b>	48,40
<b>12</b>	100,00	<b>32</b>	38,08	<b>52</b>	100,00	<b>72</b>	100,00
<b>13</b>	100,00	<b>33</b>	24,53	<b>53</b>	100,00	<b>73</b>	56,21
<b>14</b>	79,24	<b>34</b>	63,26	<b>54</b>	58,93	<b>74</b>	83,81
<b>15</b>	60,22	<b>35</b>	54,92	<b>55</b>	91,88	<b>75</b>	100,00
<b>16</b>	52,00	<b>36</b>	51,67	<b>56</b>	73,46	<b>76</b>	77,13
<b>17</b>	100,00	<b>37</b>	10,00	<b>57</b>	52,04	<b>77</b>	89,64
<b>18</b>	39,90	<b>38</b>	8,69	<b>58</b>	84,11	<b>78</b>	77,37
<b>19</b>	98,61	<b>39</b>	16,43	<b>59</b>	100,00	<b>79</b>	100,00
<b>20</b>	63,61	<b>40</b>	59,96	<b>60</b>	100,00	<b>80</b>	100,00

A partir dos dados calculados da qualidade  $Q_v$  efetuou-se a análise estatística e geraram-se os modelos de regressão.

#### 4.3.5 Largura de fenda e desvio de perpendicularidade

Os experimentos de corte também geraram dados referentes à largura de fenda e ao desvio de perpendicularidade para os diferentes parâmetros investigados, conforme procedimento descrito na seção 3.3.4. A Tabela 4.9 apresenta os desvios de perpendicularidade ( $u$ ) e as larguras de fenda ( $k_w$ ) medidas nas amostras do experimento de corte, através dos quais foi realizaram-se as análises estatísticas e os modelos de regressão.

Tabela 4.9 – Desvio de perpendicularidade  $u$  e Largura de fenda  $k_w$  medidas no experimento de corte.

Amostra	$u$ (mm)	$k_w$ (mm)									
<b>1</b>	0,370	1,274	<b>21</b>	0,326	1,206	<b>41</b>	0,330	1,392	<b>61</b>	0,413	1,488
<b>2</b>	0,386	1,358	<b>22</b>	0,587	1,176	<b>42</b>	0,447	1,752	<b>62</b>	0,350	1,150
<b>3</b>	0,325	1,182	<b>23</b>	0,653	1,276	<b>43</b>	0,464	1,444	<b>63</b>	0,406	1,424
<b>4</b>	0,390	1,244	<b>24</b>	0,616	1,136	<b>44</b>	0,272	1,174	<b>64</b>	0,307	1,132
<b>5</b>	0,454	1,338	<b>25</b>	0,449	1,738	<b>45</b>	0,351	1,202	<b>65</b>	0,370	1,340
<b>6</b>	0,370	1,484	<b>26</b>	0,483	1,436	<b>46</b>	0,421	1,384	<b>66</b>	0,431	1,332
<b>7</b>	0,447	1,456	<b>27</b>	0,386	1,418	<b>47</b>	0,511	1,558	<b>67</b>	0,321	1,492
<b>8</b>	0,512	1,634	<b>28</b>	0,423	1,338	<b>48</b>	0,542	1,506	<b>68</b>	0,339	1,302
<b>9</b>	0,418	1,362	<b>29</b>	0,649	1,103	<b>49</b>	0,384	1,322	<b>69</b>	0,438	1,690
<b>10</b>	0,426	1,334	<b>30</b>	0,395	1,326	<b>50</b>	0,417	1,440	<b>70</b>	0,438	1,448
<b>11</b>	0,469	1,426	<b>31</b>	0,381	1,260	<b>51</b>	0,522	1,754	<b>71</b>	0,328	1,134
<b>12</b>	0,515	1,692	<b>32</b>	0,654	1,235	<b>52</b>	0,385	1,352	<b>72</b>	0,282	1,242
<b>13</b>	0,490	1,478	<b>33</b>	0,430	1,235	<b>53</b>	0,403	1,710	<b>73</b>	0,385	1,496
<b>14</b>	0,451	1,470	<b>34</b>	0,407	1,420	<b>54</b>	0,342	1,450	<b>74</b>	0,741	1,500
<b>15</b>	0,305	1,224	<b>35</b>	0,322	1,058	<b>55</b>	0,417	1,352	<b>75</b>	0,597	1,234
<b>16</b>	0,544	1,608	<b>36</b>	0,575	1,618	<b>56</b>	0,508	1,548	<b>76</b>	0,374	1,072
<b>17</b>	0,511	1,526	<b>37</b>	0,598	1,706	<b>57</b>	0,329	1,160	<b>77</b>	0,416	1,434
<b>18</b>	0,389	1,330	<b>38</b>	0,483	1,136	<b>58</b>	0,328	1,016	<b>78</b>	0,493	1,542
<b>19</b>	0,590	1,678	<b>39</b>	0,701	1,346	<b>59</b>	0,332	1,004	<b>79</b>	0,554	1,836
<b>20</b>	0,365	1,264	<b>40</b>	0,587	1,276	<b>60</b>	0,443	1,450	<b>80</b>	0,365	1,882

#### 4.4 Análise estatística

Esta seção apresenta a análise estatística dos dados coletados a partir da realização dos experimentos. Utilizou-se o software estatístico Minitab®, para a realização das análises de variância (ANOVA) e construção das principais figuras e diagramas apresentados nesta seção.

Todas as análises foram realizadas considerando um nível de confiabilidade para o erro tipo I de 95%, em um intervalo bilateral. Não foi necessária a realização de nenhuma transformação nas variáveis medidas pelo fato de que os critérios de validade dos modelos foram adequados para todas as análises realizadas.

##### 4.4.1 Qualidade de percepção visual

A Tabela 4.10 apresenta a ANOVA obtida utilizando a classificação do nível de qualidade de percepção visual ( $Q_v$ ) do experimento de corte realizado em chapas finas de ágata. O coeficiente de determinação  $R^2$  da análise obtido foi de 64%.

Tabela 4.10 - Análise de variância do nível de qualidade  $Q_v$  no corte com jato abrasivo de chapa de ágata fina com espessura média de 5,3 mm.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	Valor F	Valor-P
Modelo	13	11086,9	852,84	3,66	0,002
Linear	4	7308,6	1827,15	7,84	<0,000
$V_f$	1	1209,9	1209,90	5,19	0,031
$\dot{m}_A$	1	5472,8	5472,78	23,49	<0,000
$d_S$	1	154,4	154,44	0,66	0,423
$P$	1	471,5	471,49	2,02	0,167
Quadrado	3	2278,1	759,38	3,26	0,038
$V_f * V_f$	1	0,2	0,18	0,00	0,978
$\dot{m}_A * \dot{m}_A$	1	2117,2	2117,20	9,09	0,006
$d_S * d_S$	1	55,2	55,18	0,24	0,631
Interação com 2 Fatores	6	1500,1	250,02	1,07	0,404
$V_f * \dot{m}_A$	1	150,8	150,80	0,65	0,428
$V_f * d_S$	1	33,5	33,52	0,14	0,708
$V_f * P$	1	6,2	6,24	0,03	0,871
$\dot{m}_A * d_S$	1	402,6	402,60	1,73	0,200
$\dot{m}_A * P$	1	494,9	494,91	2,12	0,157
$d_S * P$	1	412,1	412,06	1,77	0,195
Erro	26	6057,1	232,96		
Falta de ajuste	16	1796,3	112,27	0,26	0,991
Erro puro	10	4260,8	426,08	*	*
Total	39	17144,0			

Como mostra a Tabela 4.10, das quatro variáveis de processo consideradas, a velocidade de avanço ( $V_f$ ) e a vazão mássica de abrasivo ( $\dot{m}_A$ ) mostraram-se estatisticamente significativos

para a determinação do nível de qualidade de percepção visual. A análise também indica que o termo quadrado da vazão mássica de abrasivo ( $\dot{m}_A * \dot{m}_A$ ) possui grande efeito sobre  $Q_v$ . Os demais parâmetros (pressão de trabalho ( $P$ ) e distância de afastamento da tubeira ( $d_S$ )) bem como os termos de interação não se mostraram significativos, indicando que possuem pouca influência sobre  $Q_v$  para o corte via AWJ em chapas finas de ágata. A Figura 4.10 apresenta o diagrama de Pareto de efeitos padronizados, que mostra em ordem decrescente os fatores de maior efeito sobre o nível de qualidade  $Q_v$  relacionados à distribuição de probabilidade estatística  $t$ . A linha tracejada do diagrama de Pareto indica a linha de referência para a significância estatística, sendo que os fatores estatisticamente significativos ultrapassam esta linha. A Figura 4.11 apresenta os gráficos de efeitos principais, através do qual é possível analisar o grau e direção dos diferentes efeitos de cada um dos termos analisados sobre a variável de resposta.

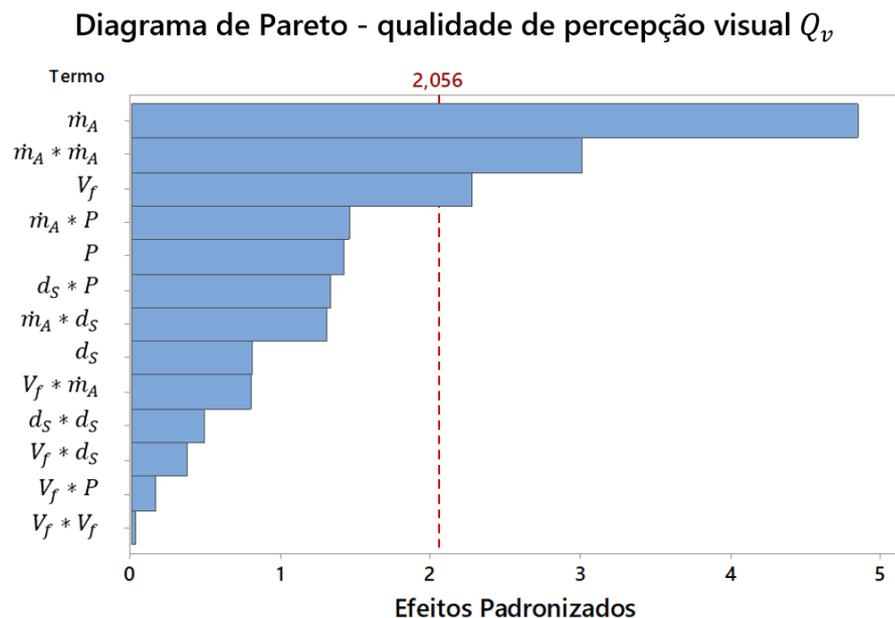


Figura 4.10 – Diagrama de Pareto para nível de qualidade  $Q_v$  no corte com jato abrasivo de chapas finas de ágata com espessura média de 5,3 mm.

A partir da Figura 4.10 tem-se que o fator de maior influência para o nível de qualidade de percepção visual em chapas finas de ágata é a vazão mássica de abrasivo ( $\dot{m}_A$ ), seguida pelo seu termo quadrado ( $\dot{m}_A * \dot{m}_A$ ) e pela velocidade de avanço ( $V_f$ ), o que mostra uma alta influência da vazão mássica ( $\dot{m}_A$ ) sobre o nível de qualidade ( $Q_v$ ).

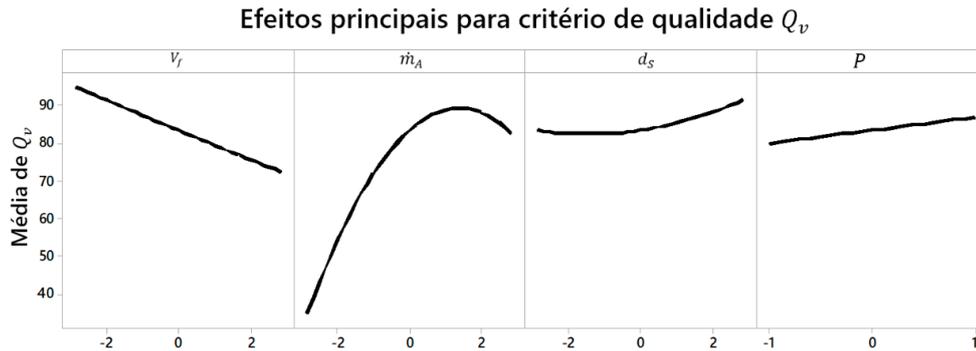


Figura 4.11 – Efeitos das variáveis de entrada sobre a média do nível de qualidade  $Q_v$  em chapas finas de ágata com espessura média de 5,3 mm.

Já pela Figura 4.11 verifica-se que o aumento da velocidade de avanço ( $V_f$ ) causa redução no nível de qualidade  $Q_v$ . Além disso, a vazão mássica ( $\dot{m}_A$ ) apresenta um comportamento não linear, indicando que o ponto de máxima qualidade fica aproximadamente no terceiro quarto superior da região de estudo. Isto indica que, a partir de determinados valores (aproximadamente 190 g/min), o aumento da vazão mássica não contribui para o aumento do nível de qualidade  $Q_v$ , somente aumentando o custo do processo. Em relação à pressão ( $P$ ), verifica-se que, apesar de pequena, o seu aumento causa melhoria no nível de qualidade  $Q_v$ .

Para as chapas grossas, foi realizado um estudo semelhante em relação ao critério de qualidade  $Q_v$ . A Tabela 4.11 apresenta a ANOVA executada nos resultados obtidos com os dados de qualidade nas chapas grossas. O coeficiente de determinação  $R^2$  desta análise obtido foi de 76%.

Pela Tabela 4.11 observa-se que a velocidade de avanço e a pressão de trabalho são os fatores que se mostraram estatisticamente significativos para a determinação do nível de qualidade de percepção visual em chapas de ágata com espessura média de 13,7 mm cortadas por jato de abrasivo de água. Nenhum dos termos quadrados ou de interação foram indicados como estatisticamente significativos pela análise de variância. A Figura 4.12 apresenta o diagrama de Pareto e a Figura 4.13 apresenta os gráficos de efeitos principais dos diferentes termos analisados no nível de qualidade da superfície usinada em chapas grossas de ágata.

Tabela 4.11 - Análise de variância do nível de qualidade  $Q_v$  no corte com jato abrasivo de chapa de ágata grossa com espessura média de 13,7 mm.

Fonte	GL	SQ	QM	Valor F	Valor-P
Modelo	13	24936,9	1918,2	6,52	<0,000
Linear	4	20223,5	5055,9	17,19	<0,000
$V_f$	1	6620,2	6620,2	22,51	<0,000
$\dot{m}_A$	1	726,5	726,5	2,47	0,128
$d_S$	1	31,8	31,8	0,11	0,745
$P$	1	12845,1	12845,1	43,68	<0,000
Quadrado	3	1428,3	476,1	1,62	0,209
$V_f * V_f$	1	412,8	412,8	1,40	0,247
$\dot{m}_A * \dot{m}_A$	1	730,7	730,7	2,48	0,127
$d_S * d_S$	1	176,1	176,1	0,60	0,446
Interação com 2 Fatores	6	3285,2	547,5	1,86	0,126
$V_f * \dot{m}_A$	1	627,4	627,4	2,13	0,156
$V_f * d_S$	1	124,3	124,3	0,42	0,521
$V_f * P$	1	887,4	887,4	3,02	0,094
$\dot{m}_A * d_S$	1	550,3	550,3	1,87	0,183
$\dot{m}_A * P$	1	407,3	407,3	1,39	0,250
$d_S * P$	1	688,6	688,6	2,34	0,138
Erro	26	7645,8	294,1		
Falta de ajuste	16	4264,9	266,6	0,79	0,676
Erro puro	10	3380,9	338,1	*	*
Total	39	32582,8			

Diagrama de Pareto - qualidade de percepção visual  $Q_v$

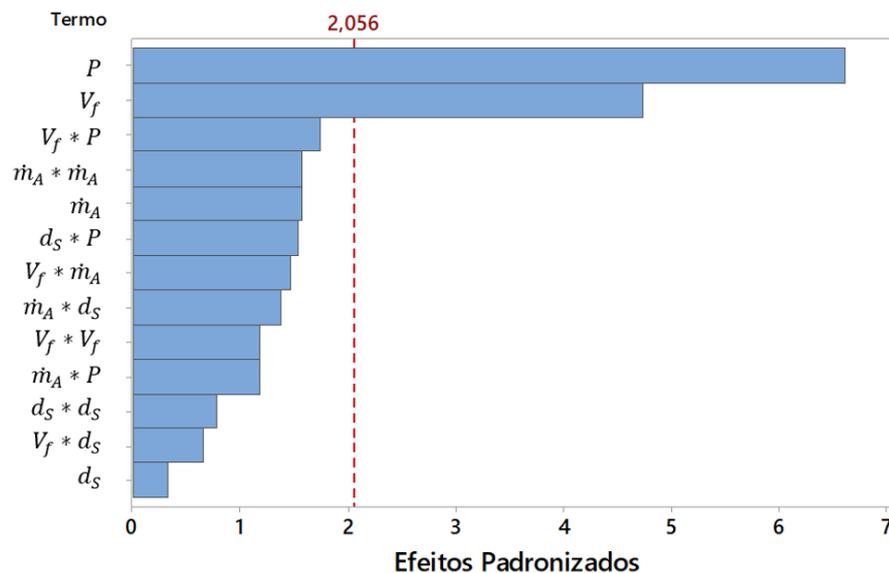


Figura 4.12 – Diagrama de Pareto para nível de qualidade  $Q_v$  no corte com jato abrasivo de chapas grossas de ágata com espessura média de 13,7 mm.

A Figura 4.12 mostra que o fator de maior influência sobre o nível de qualidade  $Q_v$  no corte com jato abrasivo de chapas grossas de ágata é a pressão de trabalho ( $P$ ), distintamente

do que era observado em chapas finas, onde o fator de maior influência é a vazão mássica de abrasivo ( $\dot{m}_A$ ). Este fato indica que a espessura da peça a ser cortada é um fator importante a ser considerado para o nível de qualidade, uma vez que modifica o grau de influência dos demais fatores. A velocidade de avanço ( $V_f$ ) continua sendo, assim como para chapas finas, estatisticamente significativa. Destaca-se aqui que a vazão mássica de abrasivo torna-se não significativa para o critério de qualidade  $Q_v$  para chapas grossas, indicando que a quantidade de energia dispensada no processo, oriunda da pressão de trabalho, é mais importante do que o número de grãos abrasivos, uma vez que, quanto maior for a espessura da peça, maior será a distância em que as partículas abrasivas devem continuar ativas realizando a remoção do material.

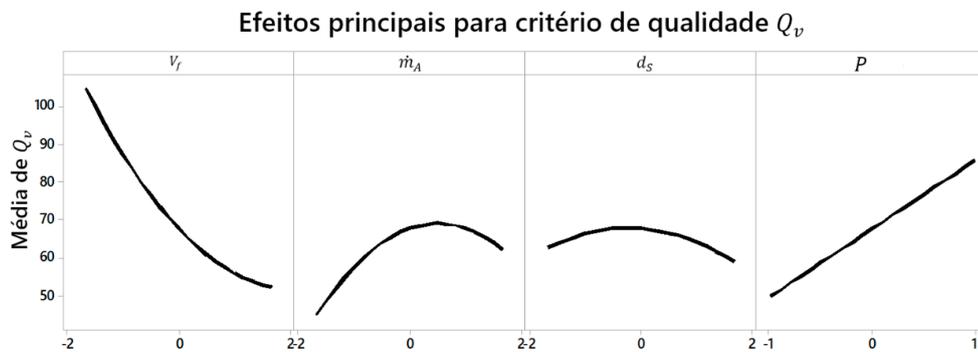


Figura 4.13 – Efeitos das variáveis de entrada sobre a média do nível de qualidade  $Q_v$  em chapas grossas de ágata com espessura média de 13,7 mm.

Na Figura 4.13, observa-se que o comportamento dos efeitos principais de cada um dos termos estudados na análise é semelhante para ambas as espessuras de chapas estudadas. Contudo, evidencia-se o aumento da influência da pressão sobre o nível de qualidade  $Q_v$ , mantendo-se o comportamento não linear da vazão mássica de abrasivo. Também é interessante salientar que a distância de afastamento da tubeira ( $d_s$ ) apresenta um ponto de máxima nessa análise, indicando que um nível intermediário (em torno de 3 mm) deste parâmetro tende a maximizar a qualidade do corte.

#### 4.4.2 Largura de fenda

A Tabela 4.12 apresenta a ANOVA realizada a partir dos dados coletados no experimento de corte sobre a largura da fenda ( $k_W$ ) em chapas finas de ágata. O coeficiente de determinação  $R^2$  da análise foi de 86%.

Tabela 4.12 - Análise de variância da largura de fenda  $k_w$  obtida no corte com jato abrasivo de chapa de ágata fina com espessura média de 5,3 mm.

Fonte	GL	SQ	QM	Valor F	Valor-P
Modelo	13	1,13903	0,087618	12,30	<0,000
Linear	4	0,88753	0,221881	31,16	<0,000
$V_f$	1	0,13672	0,136720	19,20	<0,000
$\dot{m}_A$	1	0,11117	0,111169	15,61	0,001
$d_S$	1	0,63579	0,635795	89,28	<0,000
$P$	1	0,00384	0,003842	0,54	0,469
Quadrado	3	0,15373	0,051242	7,20	0,001
$V_f * V_f$	1	0,05746	0,057458	8,07	0,009
$\dot{m}_A * \dot{m}_A$	1	0,07390	0,073895	10,38	0,003
$d_S * d_S$	1	0,00838	0,008375	1,18	0,288
Interação com 2 Fatores	6	0,09778	0,016297	2,29	0,066
$V_f * \dot{m}_A$	1	0,02465	0,024649	3,46	0,074
$V_f * d_S$	1	0,00005	0,000049	0,01	0,935
$V_f * P$	1	0,00004	0,000042	0,01	0,940
$\dot{m}_A * d_S$	1	0,03349	0,033489	4,70	0,039
$\dot{m}_A * P$	1	0,00210	0,002096	0,29	0,592
$d_S * P$	1	0,03745	0,037455	5,26	0,030
Erro	26	0,18515	0,007121		
Falta de ajuste	16	0,09878	0,006174	0,71	0,735
Erro puro	10	0,08637	0,008637	*	*
Total	39	1,32418			

Como se observa na Tabela 4.12, a velocidade de avanço ( $V_f$ ), vazão mássica de abrasivo ( $\dot{m}_A$ ) e distância de afastamento da tubeira ( $d_S$ ) possuem efeito estatisticamente significativo para os resultados da largura de fenda do corte, sendo que a pressão de trabalho não se mostrou significativa. Ainda, a análise indica que os termos de segunda ordem da velocidade de avanço e vazão de abrasivo são significativos, assim como algumas interações entre os fatores ( $\dot{m}_A * d_S$  e  $d_S * P$ ). A Figura 4.14 apresenta o diagrama de Pareto e a Figura 4.15 apresenta os gráficos de efeitos principais dos diferentes termos analisados largura de fenda em chapas finas de ágata.

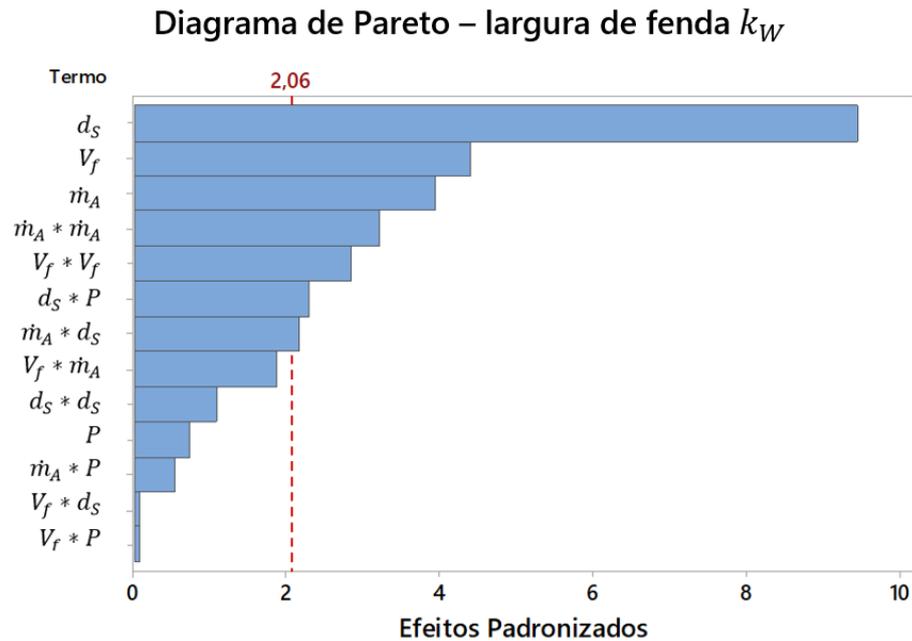


Figura 4.14 – Diagrama de Pareto para largura de fenda  $k_W$  obtida no corte com jato abrasivo de chapas finas de ágata com espessura média de 5,3 mm.

A partir da Figura 4.14 visualiza-se que o fator de maior influência para a largura de fenda em chapas finas é a distância de afastamento da tubeira ( $d_s$ ) seguido pela velocidade de avanço ( $V_f$ ) e vazão mássica de abrasivo ( $\dot{m}_A$ ).

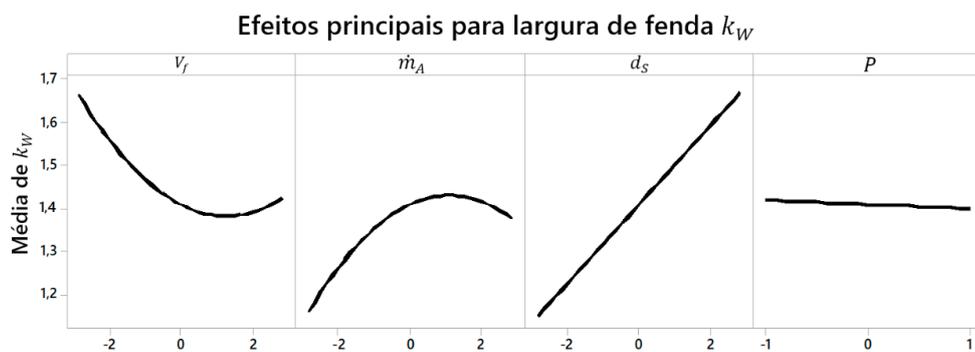


Figura 4.15 – Efeitos das variáveis de entrada sobre a média largura de fenda  $k_W$  em chapas finas de ágata com espessura média de 5,3 mm.

A Figura 4.15 apresenta o comportamento dos efeitos principais de cada um dos termos estudados na análise. A elevação da distância de afastamento da tubeira causa aumento na largura de fenda, o que pode ser explicado pelo fato de que, à medida que o jato se afasta da saída do tubo de mistura, o seu diâmetro aumenta, elevando também a dispersão das partículas abrasivas, ocasionando um corte mais largo. Também verifica-se que a largura de fenda aumenta com a elevação da vazão mássica de abrasivo, uma vez que, quanto maior o número

de partículas abrasivas atuando simultaneamente, maior também será a taxa de remoção de material. Ainda, o aumento da velocidade de avanço ( $V_f$ ) causa redução na largura de fenda, causado pelo fato de que, quanto maior a velocidade, menor é o tempo que o jato interage sobre a peça, removendo uma menor quantidade de material. A pressão de trabalho ( $P$ ) possui pouco efeito sobre a largura de fenda resultante.

Mostraram-se estatisticamente significativas as interações entre a vazão mássica de abrasivo e distância de afastamento da tubeira ( $\dot{m}_A * d_S$ ) e distância de afastamento da tubeira e pressão de trabalho ( $d_S * P$ ). Contudo, nenhuma destas interações apresenta grandes mudanças em relação aos efeitos das variáveis de processo sobre a largura de fenda.

A Tabela 4.13 apresenta a ANOVA realizada a partir dos dados coletados no experimento de corte sobre a largura da fenda ( $k_w$ ) em chapas grossas de ágata. O coeficiente de determinação  $R^2$  da análise foi de 85%.

Tabela 4.13 - Análise de variância da largura de fenda  $k_w$  obtida no corte com jato abrasivo de chapa de ágata grossa com espessura média de 13,7 mm.

Fonte	GL	SQ	QM	Valor F	Valor-P
Modelo	13	1,46412	0,112625	12,02	<0,000
Linear	4	1,24656	0,311639	33,26	<0,000
$V_f$	1	0,30240	0,302402	32,27	<0,000
$\dot{m}_A$	1	0,09110	0,091099	9,72	0,004
$d_S$	1	0,77836	0,778362	83,06	<0,000
$P$	1	0,07469	0,074693	7,97	0,009
Quadrado	3	0,16532	0,055107	5,88	0,003
$V_f * V_f$	1	0,06248	0,062475	6,67	0,016
$\dot{m}_A * \dot{m}_A$	1	0,08649	0,086492	9,23	0,005
$d_S * d_S$	1	0,00005	0,000052	0,01	0,941
Interação com 2 Fatores	6	0,05225	0,008708	0,93	0,491
$V_f * \dot{m}_A$	1	0,00515	0,005148	0,55	0,465
$V_f * d_S$	1	0,00281	0,002809	0,30	0,589
$V_f * P$	1	0,00005	0,000047	0,01	0,944
$\dot{m}_A * d_S$	1	0,02465	0,024649	2,63	0,117
$\dot{m}_A * P$	1	0,01077	0,010769	1,15	0,294
$d_S * P$	1	0,00882	0,008824	0,94	0,341
Erro	26	0,24364	0,009371		
Falta de ajuste	16	0,16909	0,010568	1,42	0,292
Erro puro	10	0,07455	0,007455	*	*
Total	39	1,70776			

Como se observa na Tabela 4.12, todos os fatores principais do experimento possuem efeito estatisticamente significativo para os resultados da largura de fenda, assim como os termos de segunda ordem da velocidade de avanço ( $V_f$ ) e vazão de abrasivo ( $\dot{m}_A$ ). Para este caso, nenhuma das interações mostrou-se estatisticamente significativa. A Figura 4.16

apresenta o Diagrama de Pareto e a Figura 4.17 apresenta os gráficos de efeitos principais dos diferentes termos analisados para a largura de fenda em chapas grossas de ágata.

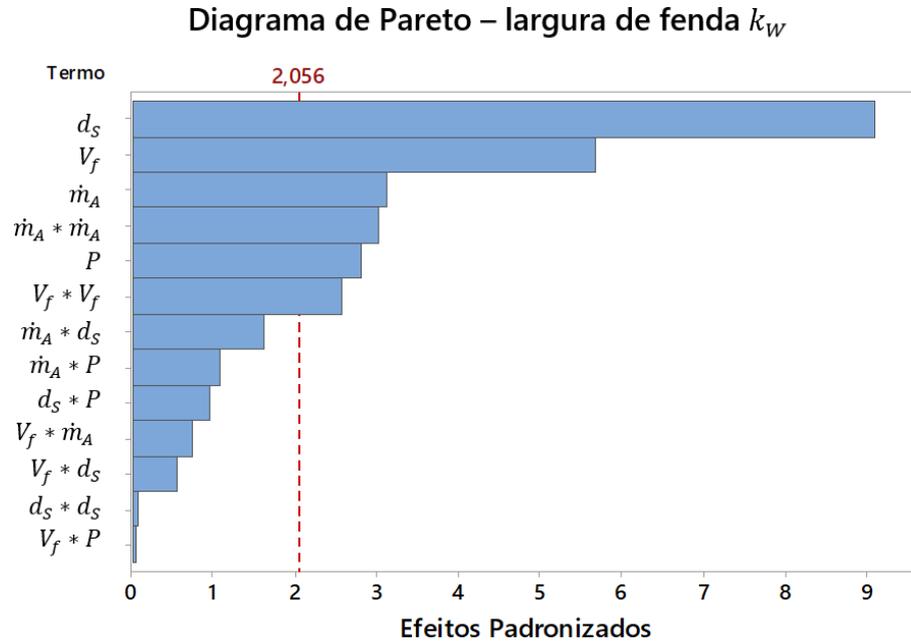


Figura 4.16 – Diagrama de Pareto para largura de fenda  $k_W$  obtida no corte com jato abrasivo de chapas grossas de ágata com espessura média de 13,7 mm.

A partir da Figura 4.16 tem-se que, assim como em chapas finas, o fator de maior influência para a largura de fenda em chapas finas é a distância de afastamento da tubeira ( $d_S$ ), seguido pela velocidade de avanço ( $V_f$ ) e vazão de abrasivo. Isto mostra que a espessura da peça não é um fator de interação importante para a largura de fenda, uma vez que não modifica a ordem de influência dos fatores principais. Contudo, não se deve negligenciar o fato de que o aumento da espessuras da peça de trabalho torna a pressão mais influente sobre as variáveis de resposta.

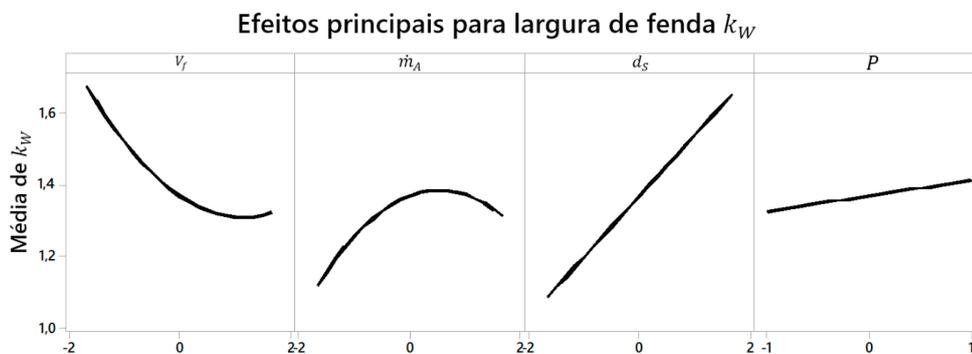


Figura 4.17 – Efeitos das variáveis de entrada sobre a média largura de fenda  $k_W$  em chapas grossas de ágata com espessura média de 13,7 mm.

A Figura 4.17 apresenta o comportamento dos efeitos principais de cada um dos termos estudados. Verifica-se que o resultado é semelhante ao observado em chapas finas, onde o fator de maior influência é a distância de afastamento da tubeira ( $d_S$ ) e que a pressão ( $P$ ), mesmo sendo estatisticamente significativa para chapas grossas, contribui muito pouco no resultado final de  $k_w$ .

#### 4.4.3 Desvio de perpendicularidade

A Tabela 4.12 apresenta a ANOVA realizada a partir dos dados coletados no experimento sobre o desvio de perpendicularidade ( $u$ ) em chapas finas de ágata. O coeficiente de determinação  $R^2$  da análise foi de 71%.

Tabela 4.14 - Análise de variância para o desvio de perpendicularidade  $u$  medido no corte com jato abrasivo de chapa fina de ágata com espessura média de 5,3 mm.

Fonte	GL	SQ	QM	Valor F	Valor-P
Modelo	13	0,161591	0,012430	5,01	<0,000
Linear	4	0,111062	0,027765	11,20	<0,000
$V_f$	1	0,000278	0,000278	0,11	0,740
$\dot{m}_A$	1	0,036575	0,036575	14,75	0,001
$d_S$	1	0,065828	0,065828	26,55	<0,000
$P$	1	0,008381	0,008381	3,38	0,077
Quadrado	3	0,022744	0,007581	3,06	0,046
$V_f * V_f$	1	0,000041	0,000041	0,02	0,899
$\dot{m}_A * \dot{m}_A$	1	0,021988	0,021988	8,87	0,006
$d_S * d_S$	1	0,000908	0,000908	0,37	0,550
Interação com 2 Fatores	6	0,027785	0,004631	1,87	0,125
$V_f * \dot{m}_A$	1	0,002475	0,002475	1,00	0,327
$V_f * d_S$	1	0,004935	0,004935	1,99	0,170
$V_f * P$	1	0,014550	0,014550	5,87	0,023
$\dot{m}_A * d_S$	1	0,005663	0,005663	2,28	0,143
$\dot{m}_A * P$	1	0,000157	0,000157	0,06	0,803
$d_S * P$	1	0,000005	0,000005	0,00	0,964
Erro	26	0,064468	0,002480		
Falta de ajuste	16	0,030244	0,001890	0,55	0,860
Erro puro	10	0,034224	0,003422	*	*
Total	39	0,226058			

Através dos dados apresentados na Tabela 4.14 verifica-se que a vazão mássica de abrasivo ( $\dot{m}_A$ ) e distância de afastamento da tubeira ( $d_S$ ) possuem efeito estatisticamente significativo para os resultados do desvio de perpendicularidade ( $u$ ) no corte de chapas finas de ágata. Também observa-se que o termo relacionado à pressão ( $P$ ) está com um valor P de 0,077, que ultrapassa o valor limite aceitável de erro para a rejeição da hipótese nula (0,05), mas indica proximidade em nível de significância. A análise ainda indica que o termo de segunda ordem

da vazão mássica de abrasivo ( $\dot{m}_A * \dot{m}_A$ ) é estatisticamente significativo, assim como a interação entre a velocidade de avanço e a pressão de trabalho ( $V_f * P$ ).

A Figura 4.18 apresenta o Diagrama de Pareto e a Figura 4.19 apresenta os gráficos de efeitos principais dos diferentes termos analisados para o defeito de perpendicularidade em chapas finas de ágata.

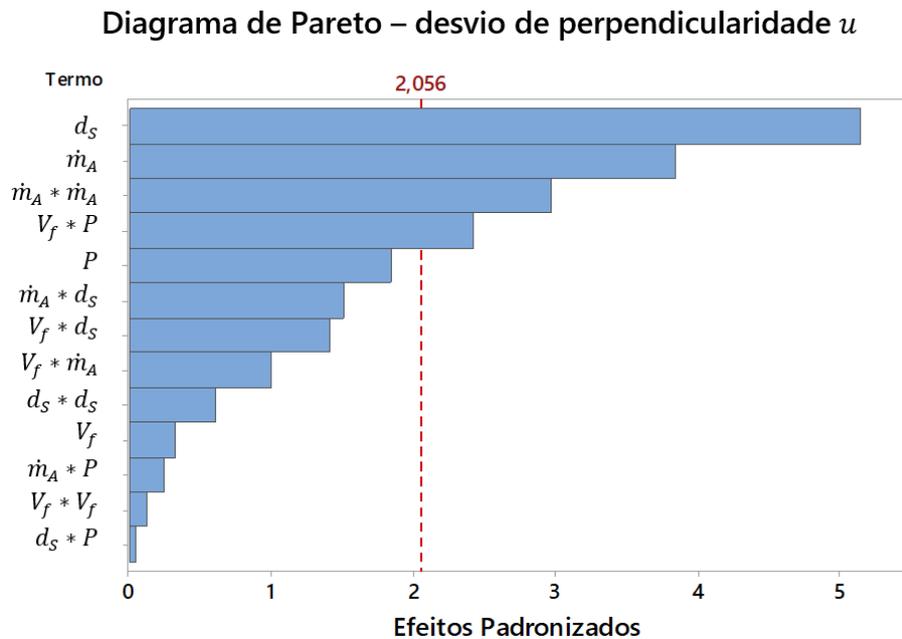


Figura 4.18 – Diagrama de Pareto para o desvio de perpendicularidade  $u$  medido no corte com jato abrasivo de chapas finas de ágata com espessura média de 5,3 mm.

A partir da Figura 4.18 nota-se que o fator de maior influência para o desvio de perpendicularidade em chapas finas é a distância de afastamento da tubeira ( $d_s$ ), seguido pela vazão mássica de abrasivo ( $\dot{m}_A$ ) e seu termo quadrado.

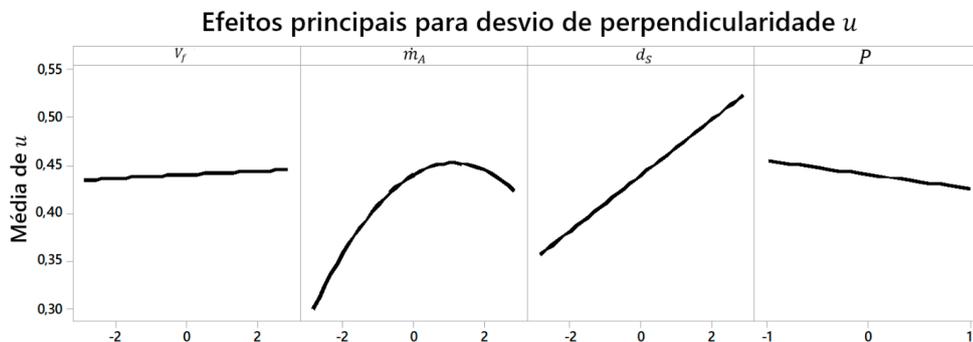


Figura 4.19 – Efeitos das variáveis de entrada sobre a média do desvio de perpendicularidade  $u$  medido em chapas finas de ágata com espessura média de 5,3 mm.

A Figura 4.19 apresenta o comportamento dos efeitos principais de cada um dos termos analisados. Verifica-se que o aumento tanto na distância de afastamento da tubeira ( $d_s$ ) quanto na vazão mássica de abrasivo ( $\dot{m}_A$ ) causam aumento no desvio de perpendicularidade. Ainda, tanto a pressão de trabalho ( $P$ ) quanto a velocidade de avanço ( $V_f$ ) possuem pouco efeito sobre a variação no desvio de perpendicularidade. Estes resultados podem ser explicados pelo fato de que, em menores distâncias de afastamento da tubeira, existe uma menor tendência à variação na posição das partículas durante a realização do corte, ocasionando menores desvios de perpendicularidade. À medida que a distância de afastamento da tubeira aumenta, o diâmetro do jato abrasivo cresce e qualquer desvio de posicionamento pode ser agravado pela dispersão das partículas abrasivas. Ainda, percebe-se que o excesso de partículas abrasivas contribui negativamente para o controle do desvio de perpendicularidade. Isto pode ser explicado pelo fato de que os grãos abrasivos perdem o seu direcionamento ao se distanciar do tubo de mistura, sendo que, quanto maior for a vazão mássica de abrasivo, mais difícil também manter o jato coeso e sem desvios ao longo de sua trajetória.

Destaca-se que mostrou-se estatisticamente significativa a interação entre a velocidade de avanço e a pressão de trabalho. A Figura 4.20 mostra o gráfico de interação entre os fatores principais para o desvio de perpendicularidade em chapas finas de ágata.

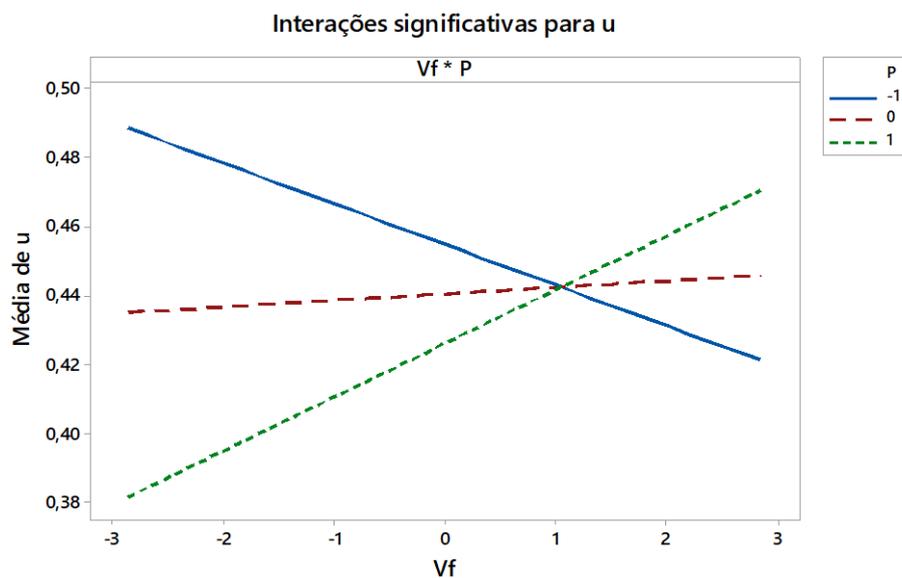


Figura 4.20 – Gráfico de interações para o desvio de perpendicularidade  $u$  em chapas finas de ágata.

Através da análise da Figura 4.20 verifica-se que o aumento da pressão de trabalho ( $P$ ) modifica o efeito da velocidade de avanço ( $V_f$ ) sobre a perpendicularidade, ou seja, na pressão de trabalho baixa, o aumento da velocidade de avanço causa redução do desvio de

perpendicularidade, mas no nível alto da pressão de trabalho o aumento da velocidade de avanço causa aumento no desvio de perpendicularidade. Mesmo assim, o efeito da variação da velocidade de avanço ( $V_f$ ) pode ser considerado pequeno (aproximadamente 0,2 mm) em relação ao efeito observado nas demais variáveis de processo.

A Tabela 4.15 apresenta a análise de variância realizada a partir dos dados coletados no experimento de corte sobre o desvio de perpendicularidade ( $u$ ) em chapas grossas de ágata. O coeficiente de determinação  $R^2$  da análise foi de 35%.

Tabela 4.15 - Análise de variância para o desvio de perpendicularidade  $u$  medido no corte com jato abrasivo de chapa grossa de ágata com espessura média de 13,7 mm..

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	13	0,203925	0,015687	1,08	0,416
Linear	4	0,100811	0,025203	1,73	0,173
$V_f$	1	0,004727	0,004727	0,33	0,573
$\dot{m}_A$	1	0,004020	0,004020	0,28	0,603
$d_S$	1	0,014932	0,014932	1,03	0,320
$P$	1	0,077132	0,077132	5,31	0,029
Quadrado	3	0,028181	0,009394	0,65	0,592
$V_f * V_f$	1	0,002741	0,002741	0,19	0,668
$\dot{m}_A * \dot{m}_A$	1	0,017318	0,017318	1,19	0,285
$d_S * d_S$	1	0,006237	0,006237	0,43	0,518
Interação com 2 Fatores	6	0,074934	0,012489	0,86	0,537
$V_f * \dot{m}_A$	1	0,000246	0,000246	0,02	0,897
$V_f * d_S$	1	0,017112	0,017112	1,18	0,288
$V_f * P$	1	0,005679	0,005679	0,39	0,537
$\dot{m}_A * d_S$	1	0,051842	0,051842	3,57	0,070
$\dot{m}_A * P$	1	0,000012	0,000012	0,00	0,977
$d_S * P$	1	0,000043	0,000043	0,00	0,957
Erro	26	0,377875	0,014534		
Falta de ajuste	16	0,217399	0,013587	0,85	0,630
Erro puro	10	0,160476	0,016048	*	*
Total	39	0,581801			

Através dos dados apresentados na Tabela 4.15 verifica-se que apenas a pressão de trabalho ( $P$ ) se mostra estatisticamente significativa para os resultados do desvio de perpendicularidade no corte de chapas grossas de ágata. A Figura 4.21 apresenta o Diagrama de Pareto e a Figura 4.22 apresenta os gráficos de efeitos principais dos diferentes termos analisado para o desvio de perpendicularidade em chapas grossas de ágata.

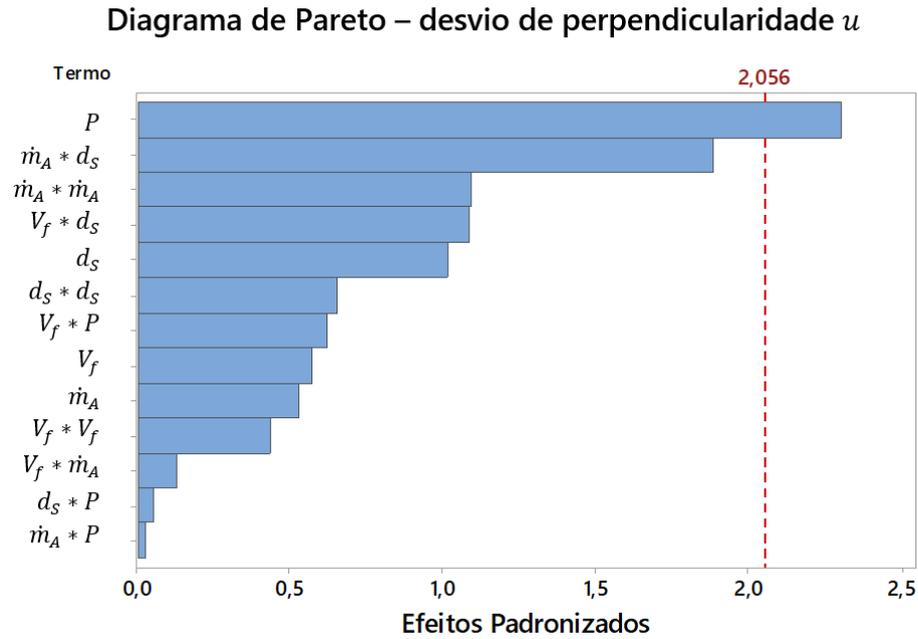


Figura 4.21 – Diagrama de Pareto para o desvio de perpendicularidade  $u$  medido no corte com jato abrasivo de chapas grossas de ágata com espessura média de 13,7 mm.

A partir da Figura 4.21, o fator de maior influência para o desvio de perpendicularidade em chapas grossas é a pressão de trabalho ( $P$ ), seguida pela interação entre a vazão mássica de abrasivo e a distância de afastamento da tubeira (não significativa).

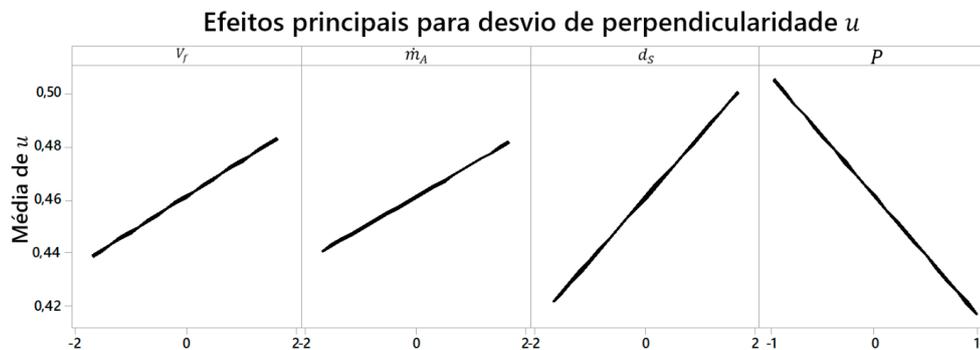


Figura 4.22 – Efeitos das variáveis de entrada sobre a média do desvio de perpendicularidade  $u$  medido em chapas grossas de ágata com espessura média de 13,7 mm.

A Figura 4.22 apresenta o comportamento dos efeitos principais de cada um dos termos estudados na análise. Verifica-se que o aumento na pressão de trabalho ( $P$ ), único termo significativo, causa redução no desvio de perpendicularidade. Para os demais fatores, o aumento do nível do fator sempre causa aumento no desvio de perpendicularidade. O baixo nível de determinação  $R^2$  do modelo indica que a variação no desvio de perpendicularidade em chapas grossas de ágata não pode ser bem explicado por nenhum dos fatores estudados, sendo que o resultado pode ter sido influenciado por fatores não controláveis.

#### 4.4.4 Rugosidade média

Como já descrito na seção 3.3.2, a rugosidade foi medida ao longo da profundidade das amostras do experimento de corte, sendo efetuadas medições em intervalos de 1,5 mm a partir da superfície de entrada do jato. Para realizar a análise estatística, considerou-se apenas as medições realizadas em 3 pontos: na área superior, inferior e no centro de cada amostra. Assim, a codificação utilizada no projeto do experimento foi de -1 (área superior), 0 (área mediana) e 1 (área inferior). Dessa forma, a ANOVA análise de variância foi realizada com cinco fatores, incluindo a altura de medição ( $h$ ) como um fator de entrada para a análise, em que se observou o seu efeito sobre a rugosidade. A Tabela 4.16 apresenta a ANOVA realizada a partir dos dados coletados no experimento de corte sobre a rugosidade média ( $Ra$ ) em chapas finas de ágata, e a Figura 4.23 o respectivo diagrama de Pareto da análise. O coeficiente de determinação  $R^2$  foi de 67%.

Tabela 4.16 - Análise de variância para o rugosidade média  $Ra$  medida no corte com jato abrasivo de chapa fina de ágata com espessura média de 5,3 mm.

Fonte	GL	SQ	QM	Valor F	Valor-P
Modelo	19	485,848	25,571	9,83	<0,000
Linear	5	242,133	48,427	18,61	<0,000
$V_f$	1	22,203	22,203	8,53	0,004
$\dot{m}_A$	1	50,555	50,555	19,42	<0,000
$P$	1	4,065	4,065	1,56	0,215
$d_S$	1	1,724	1,724	0,66	0,418
$h$	1	166,722	166,722	64,06	<0,000
Quadrado	4	149,594	37,398	14,37	<0,000
$V_f * V_f$	1	3,126	3,126	1,20	0,276
$\dot{m}_A * \dot{m}_A$	1	73,770	73,770	28,34	<0,000
$d_S * d_S$	1	0,116	0,116	0,04	0,833
$h * h$	1	69,483	69,483	26,70	<0,000
Interação com 2 Fatores	10	103,639	10,364	3,98	<0,000
$V_f * \dot{m}_A$	1	3,778	3,778	1,45	0,231
$V_f * P$	1	0,004	0,004	0,00	0,967
$V_f * d_S$	1	3,414	3,414	1,31	0,255
$V_f * h$	1	15,920	15,920	6,12	0,015
$\dot{m}_A * P$	1	0,277	0,277	0,11	0,745
$\dot{m}_A * d_S$	1	11,637	11,637	4,47	0,037
$\dot{m}_A * h$	1	41,234	41,234	15,84	<0,000
$P * d_S$	1	2,943	2,943	1,13	0,290
$P * h$	1	8,498	8,498	3,27	0,074
$d_S * h$	1	18,631	18,631	7,16	0,009
Erro	92	239,438	2,603		
Falta de ajuste	64	190,108	2,970	1,69	0,064
Erro puro	28	49,330	1,762	*	*
Total	111	725,286			

A Tabela 4.16 mostra que a velocidade de avanço ( $V_f$ ), vazão mássica de abrasivo ( $\dot{m}_A$ ) e a profundidade de medição ( $h$ ) são estatisticamente significativos para a rugosidade média  $Ra$  em chapas finas.

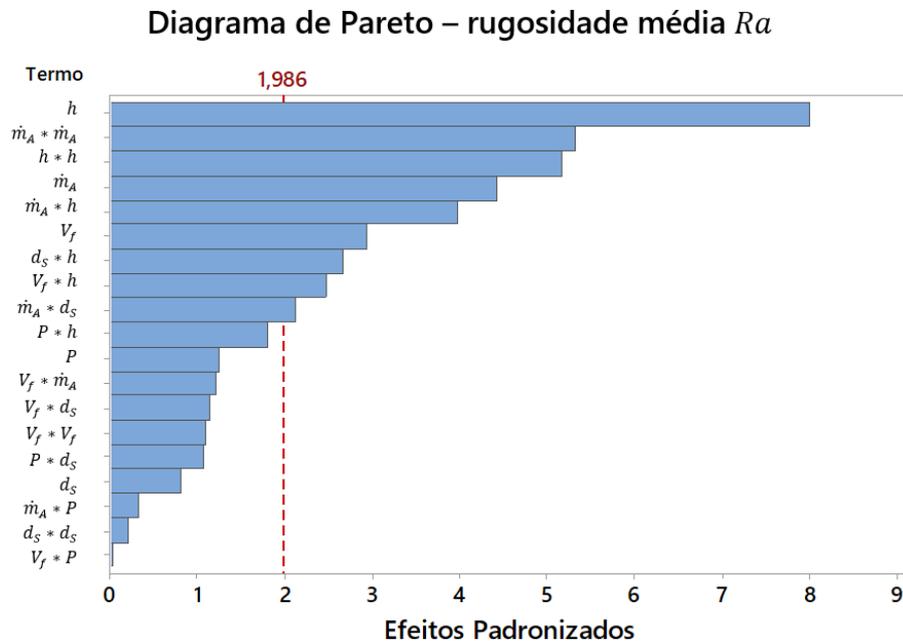


Figura 4.23 – Diagrama de Pareto para a rugosidade média  $Ra$  medida no corte com jato abrasivo de chapas finas de ágata com espessura média de 5,3 mm.

Da Figura 4.23, verifica-se que o parâmetro de maior influência é a profundidade de medição ( $h$ ), seguido pela vazão mássica de abrasivo ( $\dot{m}_A$ ) e a velocidade de avanço ( $V_f$ ) (em seus termos quadrados e interações). A Figura 4.24 apresenta os gráficos de efeitos principais dos diferentes termos analisados para a rugosidade média em chapas finas de ágata.

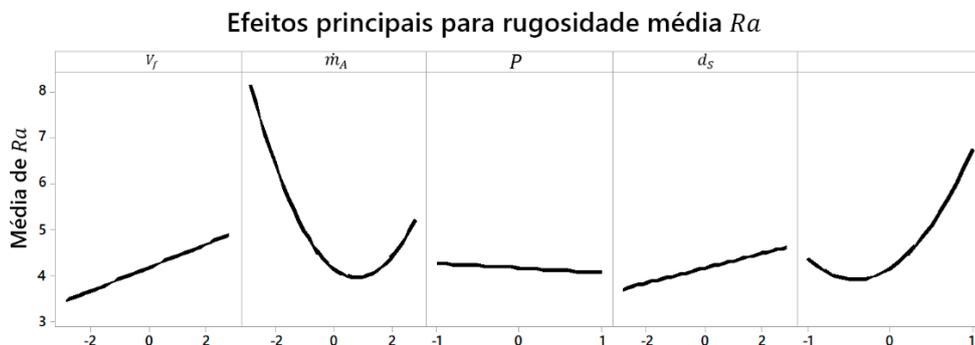


Figura 4.24 – Efeitos das variáveis de entrada sobre a média da rugosidade média  $Ra$  medida em chapas finas de ágata com espessura média de 5,3 mm.

Verifica-se, a partir da análise da Figura 4.24, que a rugosidade média aumenta à medida que são elevados os níveis da velocidade de avanço, distância de afastamento da tubeira ( $d_s$ ) e

profundidade de medição. O efeito inverso é observado na vazão mássica de abrasivo, ou seja, o aumento da quantidade de abrasivo contribui para a redução da rugosidade média até cerca de  $\frac{3}{4}$  do intervalo considerado no experimento, se elevando novamente a partir deste ponto.

A Tabela 4.17 apresenta a análise de variância realizada a partir dos dados coletados no experimento de corte sobre a rugosidade média ( $Ra$ ) em chapas grossas de ágata; observa-se que o comportamento da influência dos parâmetros de entrada sobre a rugosidade em chapas grossas de ágata é completamente diferente do mostrado em chapas finas, sendo que a pressão ( $P$ ) passa a ser mais significativa do que a velocidade de avanço ( $V_f$ ), que possui seu termo quadrado e algumas interações no limite da margem de erro, e vazão mássica de abrasivo. Para esta configuração, a distância de afastamento da tubeira ( $d_s$ ) passa a ser um parâmetro importante e decisivo no resultado final da rugosidade, contribuindo com isso para a melhoria da qualidade do corte. O coeficiente de determinação  $R^2$  da análise foi de 68%.

Tabela 4.17 - Análise de variância para o rugosidade média  $Ra$  medida no corte com jato abrasivo de chapa fina de ágata com espessura média de 5,3 mm.

Fonte	GL	SQ	QM	Valor F	Valor-P
Modelo	19	2833,17	149,11	11,25	<0,000
Linear	5	1774,65	354,93	26,79	<0,000
$V_f$	1	13,14	13,14	0,99	0,322
$\dot{m}_A$	1	10,63	10,63	0,80	0,373
$d_s$	1	17,16	17,16	1,29	0,258
$P$	1	320,49	320,49	24,19	<0,000
$h$	1	1413,24	1413,24	106,65	<0,000
Quadrado	4	519,61	129,90	9,80	<0,000
$V_f * V_f$	1	48,51	48,51	3,66	0,059
$\dot{m}_A * \dot{m}_A$	1	6,68	6,68	0,50	0,479
$d_s * d_s$	1	305,83	305,83	23,08	<0,000
$h * h$	1	162,77	162,77	12,28	0,001
Interação com 2 Fatores	10	538,91	53,89	4,07	<0,000
$V_f * \dot{m}_A$	1	55,15	55,15	4,16	0,044
$V_f * P$	1	16,30	16,30	1,23	0,270
$V_f * d_s$	1	56,53	56,53	4,27	0,041
$V_f * h$	1	7,47	7,47	0,56	0,455
$\dot{m}_A * P$	1	10,59	10,59	0,80	0,373
$\dot{m}_A * d_s$	1	44,45	44,45	3,35	0,070
$\dot{m}_A * h$	1	7,37	7,37	0,56	0,458
$P * d_s$	1	10,15	10,15	0,77	0,384
$P * h$	1	12,93	12,93	0,98	0,326
$d_s * h$	1	317,96	317,96	24,00	<0,000
Erro	100	1325,10	13,25		
Falta de ajuste	70	1120,42	16,01	2,35	0,006
Erro puro	30	204,68	6,82	*	*
Total	119	4158,27			

A Figura 4.25 apresenta o diagrama de Pareto e a Figura 4.26 apresenta os gráficos de efeitos principais para o nível de rugosidade média em chapas grossas de ágata.

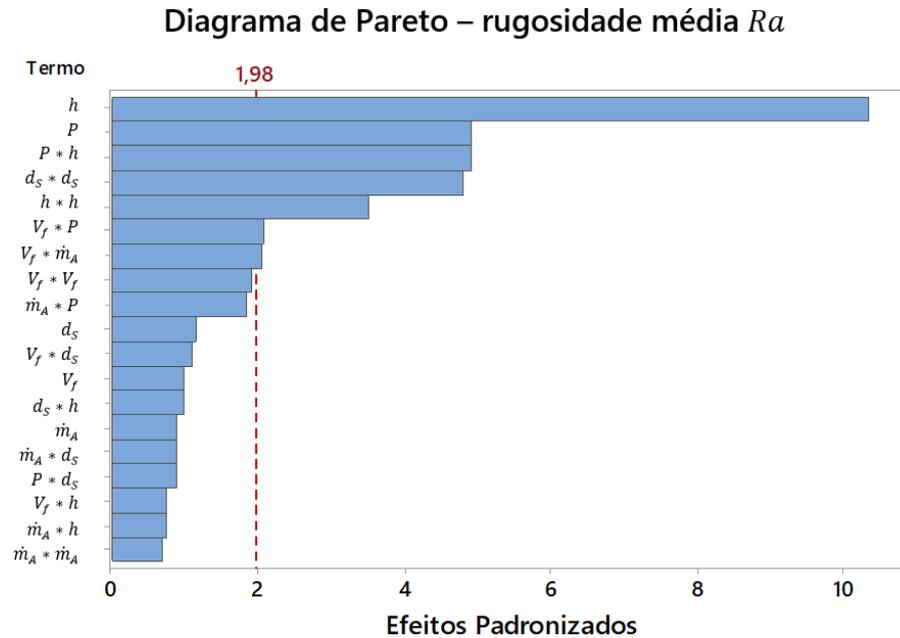


Figura 4.25 – Diagrama de Pareto para a rugosidade média  $Ra$  medida no corte com jato abrasivo de chapas grossas de ágata com espessura média de 13,7 mm.

A pressão ( $P$ ), como pode ser observado a partir da Figura 4.25, é o parâmetro de processo com maior grau de influência na rugosidade média em chapas grossas de ágata. Já a vazão mássica de abrasivo ( $\dot{m}_A$ ), que possui alto grau de influência em chapas finas, não possui efeito significativo em chapas grossas, evidenciando que o comportamento do processo se altera para diferentes espessuras do mesmo material.

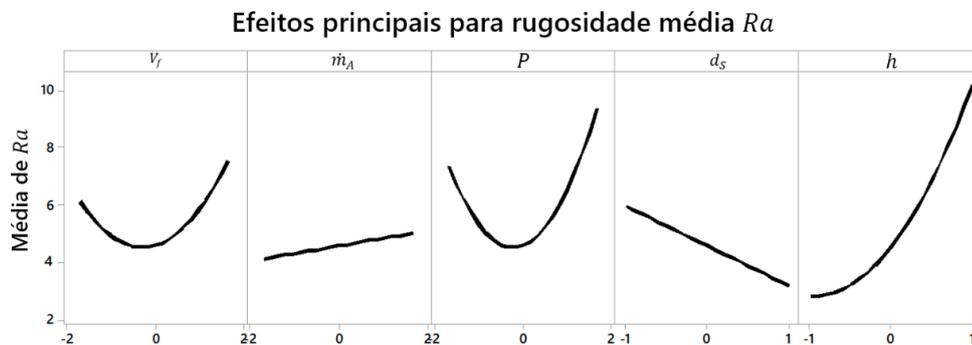


Figura 4.26 – Efeitos das variáveis de entrada sobre a média da rugosidade média  $Ra$  medida em chapas grossas de ágata com espessura média de 13,7 mm.

Verifica-se, através da análise da Figura 4.26, que o aumento da pressão de trabalho causa uma redução no nível de rugosidade média, bem como os menores níveis desta são obtidos em níveis médios de velocidade ( $V_f$ ) e distância de afastamento da tubeira ( $d_S$ ).

#### 4.5 Modelos de Regressão

Esta seção apresenta os modelos de regressão obtidos a partir dos dados coletados nos experimentos. Os modelos foram gerados com o auxílio do software Minitab® sendo que, para cada parâmetro estudado, foi construído um modelo referente a chapas finas e um modelo para chapas grossas. Todos os termos não estatisticamente significativos da ANOVA foram removidos, com exceção dos fatores principais, que foram mantidos para todos os modelos.

As equações foram construídas com base em variáveis codificadas. De acordo com Montgomery, 2012, essa configuração é preferível, pois permite a criação de experimentos ortogonais, em que a comparação entre o efeito causado por diferentes variáveis de entrada pode ser realizado diretamente na equação de regressão. Dessa forma, não é possível inserir o valor de cada parâmetro (valor de engenharia) diretamente na equação. Para isso, é necessário realizar uma interpolação linear, obtendo-se o seu valor codificado, de acordo com os limites apresentados na Tabela 4.18.

Nas equações 4.1 a 4.10, os símbolos utilizados significam:

- $V_f$  – velocidade de avanço;
- $h$  - profundidade de medição;
- $t$  – espessura da peça (perfuração);
- $\dot{m}_A$  – vazão mássica de abrasivo;
- $d_S$  – distância de afastamento da tubeira;
- $P$  – pressão de trabalho;
- $Q_v$  – nível de qualidade de percepção visual;
- $k_W$  – largura de fenda;
- $u$  – desvio de perpendicularidade.

Tabela 4.18 – Limites e códigos de interpolação para modelos de regressão.

Parâmetro	Unidade	Nível mínimo	Nível máximo	Código mínimo	Código máximo
$V_f$ (chapa fina)	mm/min	100	400	-1,68	1,68
$V_f$ (chapa grossa)	mm/min	10	80	-1,68	1,68
$h$ (chapa fina)	mm	0	5	-1	1
$h$ (chapa grossa)	mm	0	15	-1	1
$\dot{m}_A$	g/min	10	250	-1,68	1,68
$d_S$	mm	1	6	-1,68	1,68
$P$	MPa	260	340	-1,00	1
$t$	mm	6	15	-1	1

Nesta seção, os modelos foram representados de maneira simplificada através de gráficos de barras, que facilitam a visualização conjunta do efeito causado pela variação de todos os parâmetros de processo ao mesmo tempo. O Apêndice E apresenta, separadamente, gráficos de superfície de resposta e de contorno para os diferentes modelos, onde são principalmente observados os efeitos da velocidade de avanço e vazão mássica de abrasivo.

#### 4.5.1 Qualidade de percepção visual

A Equação 4.2 apresenta o modelo de regressão para predição do nível de qualidade de percepção visual ( $Q_v$ ) da superfície usinada por AWJ em chapas finas de ágata. O coeficiente de determinação  $R^2$  para o modelo é de 55%. A Figura 4.27 mostra o comportamento do modelo da Equação 4.2 perante a variação dos diferentes parâmetros de processo.

$$Q_v = 84,60 - 3,96 V_f + 8,42 \dot{m}_A + 1,41 d_S + 3,43 P - 3,077 \dot{m}_A^2 \quad (4.2)$$

Dessa forma, para prever o nível de qualidade de percepção visual em uma determinada condição de processo, deve-se proceder a conversão dos valores de engenharia para os valores codificados, como mostra a Tabela 4.19.

Tabela 4.19 – Exemplo de conversão dos valores de engenharia para valores codificados.

	Velocidade de Avanço ( $V_f$ )	Vazão mássica de abrasivo ( $\dot{m}_A$ )	Dist. afast. tubeira ( $d_S$ )	Pressão de trabalho ( $P$ )
Valor de engenharia	100 mm/min	10 g/min	6 mm	340 MPa
Valor codificado	-1,68	-1,68	1,68	1

Assim, a aplicação da Equação 4.2 para os valores apresentados na Tabela 4.19 resultariam em:

$$Q_v = 84,60 - 3,96 \cdot (-1,68) + 8,42 \cdot (-1,68) + 1,41 \cdot 1,68 + 3,43 \cdot 1 - 3,077 \cdot (-1,68)^2$$

$$Q_v = 74,22\%$$

A alteração de apenas uma das variáveis de entrada (pressão de trabalho) de seu nível alto (340 MPa – código 1) para o baixo (260 MPa – código -1) resultaria em:

$$Q_v = 84,60 - 3,96 \cdot (-1,68) + 8,42 \cdot (-1,68) + 1,41 \cdot 1,68 + 3,43 \cdot (-1) - 3,077 \cdot (-1,68)^2$$

$$Q_v = 67,36\%$$

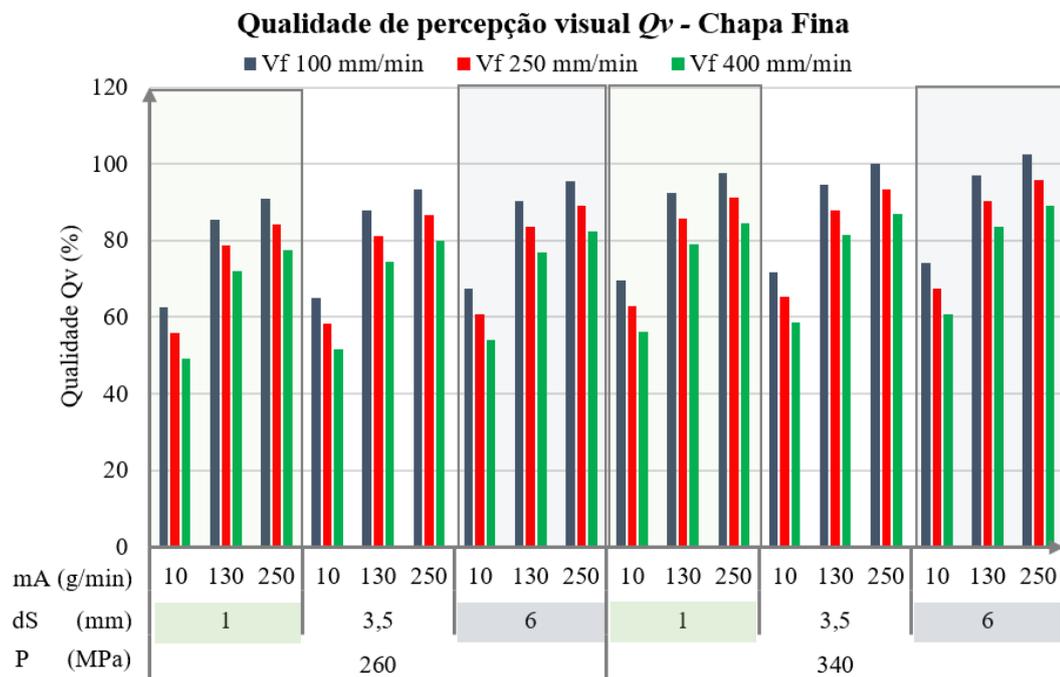


Figura 4.27 – Comportamento do modelo de predição no nível de qualidade de percepção visual  $Q_v$  para o corte com jato abrasivo de água em chapas finas de ágata com espessura média de 5,3 mm.

A partir da análise da Figura 4.27 é possível observar que os parâmetros de processo com maior efeito sobre o nível de qualidade de percepção visual são a velocidade de avanço e vazão mássica de abrasivo, sendo que a qualidade  $Q_v$  diminui com o aumento da velocidade de avanço ( $V_f$ ) e aumenta com o aumento da vazão de abrasivo ( $\dot{m}_A$ ). A pressão de trabalho ( $P$ ) possui um efeito menor, sendo que o aumento de  $P$  tende a produzir maiores níveis de  $Q_v$ . Já a variação na distância de afastamento da tubeira ( $d_S$ ) produz um efeito muito pequeno, mas onde, quanto maior for  $d_S$ , maior será  $Q_v$ .

A Equação 4.3 apresenta o modelo de regressão para predição do nível de qualidade de percepção visual ( $Q_v$ ) da superfície usinada por AWJ em chapas grossas de ágata, a partir do qual foi possível construir o gráfico da Figura 4.28, que representa de modo simplificado o comportamento do modelo. O coeficiente de determinação  $R^2$  para o modelo é de 62%.

$$Q_v = 65,20 - 15,57 V_f + 5,16 \dot{m}_A - 1,08 d_s + 17,92 P \quad (4.3)$$

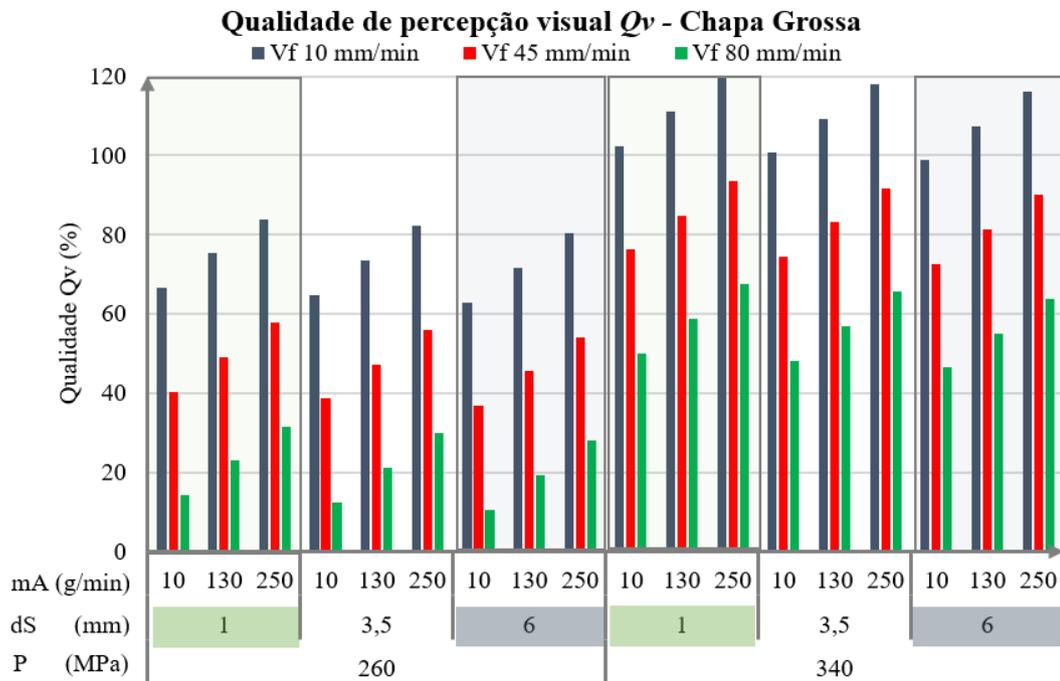


Figura 4.28 – Comportamento do modelo de predição no nível de qualidade de percepção visual  $Q_v$  para o corte com jato abrasivo de água em chapas grossas de ágata com espessura média de 13,7 mm.

O comportamento percebido para o nível de qualidade para chapas grossas é semelhante ao que ocorre em chapas finas (maior qualidade em velocidades de avanço menores). Contudo, assim como foi observado nos demais parâmetros estudados e que serão mostrados nas seções a seguir, os efeitos são mais fortes em chapas grossas do que em chapas finas. Cabe destacar que a pressão de trabalho ( $P$ ) e a velocidade de avanço ( $V_f$ ), em chapas grossas de ágata, possuem efeito muito pronunciado sobre a qualidade de percepção visual ( $Q_v$ ), sendo que quanto maior for a pressão de trabalho, maior é o nível de qualidade  $Q_v$ , e quanto menor a velocidade de avanço, maior o nível de  $Q_v$ . Observa-se também que o aumento da distância de afastamento da tubeira ( $d_s$ ) possui uma contribuição muito pequena para o aumento do nível de qualidade, sendo que os fatores determinantes para sua melhoria são a velocidade de avanço (menores níveis de  $V_f$ ) e a pressão de trabalho (maiores níveis de  $P$ ).

#### 4.5.2 Largura de fenda

A Equação 4.4 apresenta o modelo de regressão para predição da largura de fenda em chapas finas de ágata usinadas por AWJ. O coeficiente de determinação  $R^2$  para o modelo é de 83%.

$$k_W = 1,41 - 0,04 V_f + 0,03 \dot{m}_A + 0,09 d_S - 0,01 P + 0,01 V_f^2 - 0,01 \dot{m}_A^2 + 0,01 \dot{m}_A d_S + 0,02 d_S P \quad (4.4)$$

A partir deste modelo construiu-se um gráfico de colunas, que representa de maneira resumida o comportamento do modelo da Equação 4.4.

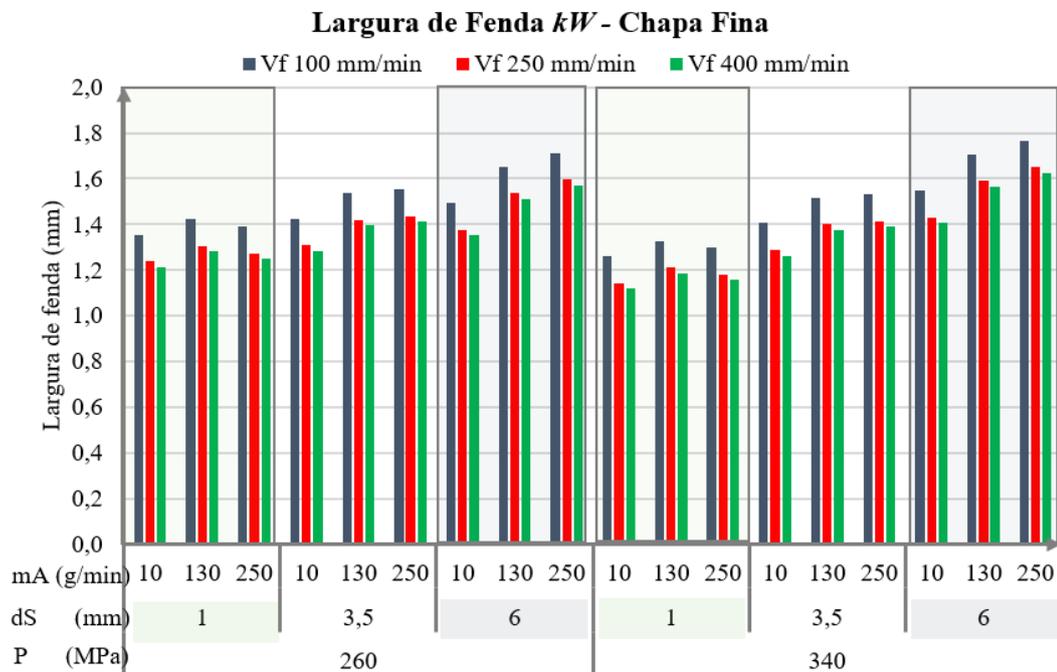


Figura 4.29 – Comportamento do modelo de predição da largura de fenda  $k_W$  no corte com jato abrasivo de água em chapas finas de ágata com espessura média de 5,3 mm.

Através da análise da Figura 4.29 verifica-se que a pressão de trabalho ( $P$ ) possui uma contribuição pequena para a determinação da largura de fenda ( $k_W$ ), sendo que o parâmetro de maior efeito para esta resposta é a distância de afastamento da tubeira ( $d_S$ ). Quanto maior for o nível de  $d_S$  maior será a largura de fenda. Também observa-se que a redução da velocidade de avanço ( $V_f$ ) e o aumento da vazão de abrasivo ( $\dot{m}_A$ ) causam aumento da largura de fenda em chapas finas de ágata.

A Equação 4.5 apresenta o modelo de regressão para predição da largura de fenda em chapas grossas de ágata usinadas por AWJ, e a Figura 4.30 gráfico de barras gerado a partir deste modelo. O coeficiente de determinação  $R^2$  para o modelo é de 83%.

$$k_W = 1,37 - 0,10 V_f + 0,05 \dot{m}_A + 0,16 d_s + 0,04 P + 0,04 V_f^2 - 0,05 \dot{m}_A^2 \quad (4.5)$$

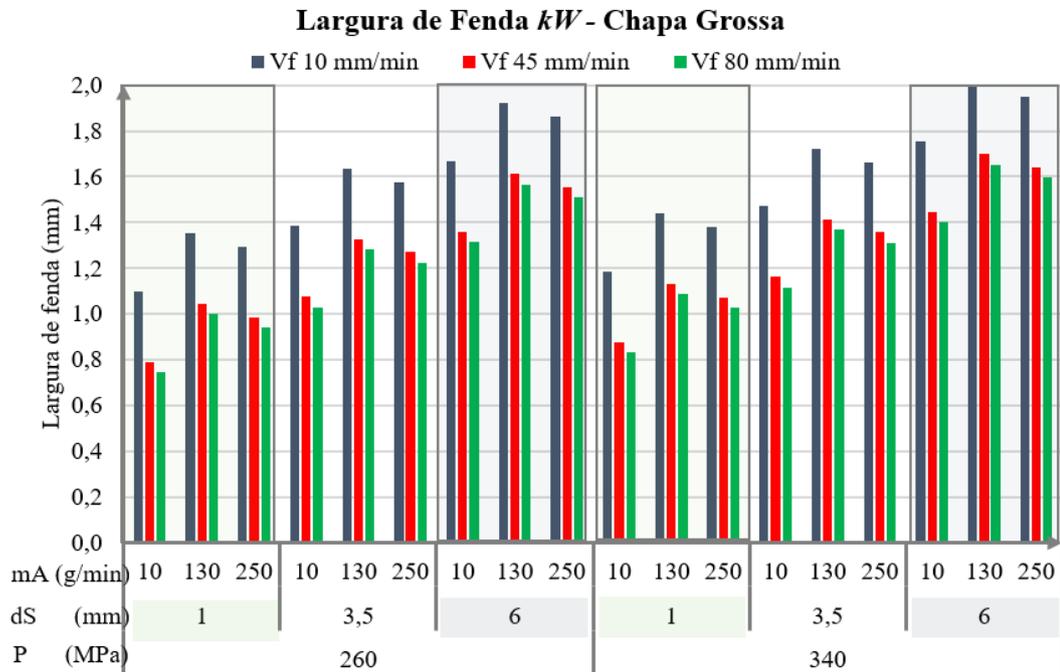


Figura 4.30 – Comportamento do modelo de previsão da largura de fenda  $k_W$  no corte com jato abrasivo de água em chapas grossas de ágata com espessura média de 13,7 mm.

Através da análise da Figura 4.30 visualiza-se que, em chapas grossas de ágata, o efeito dos parâmetros de entrada é semelhante ao observado em chapas finas, onde os maiores níveis de largura de fenda ( $k_W$ ) são obtidos em níveis mais altos de pressão ( $P$ ) e distância de afastamento da tubeira ( $d_s$ ) e menores níveis de velocidade de avanço ( $V_f$ ). Ainda, verifica-se que a pressão de trabalho ( $P$ ) tem efeito reduzido sobre a largura de fenda, sendo que o parâmetro que mais altera a resposta é a distância de afastamento da tubeira. Observa-se que existe uma tendência de aumento da largura de fenda em níveis intermediários de vazão mássica de abrasivo e em níveis mais elevados de distância de afastamento da tubeira.

Os menores níveis de largura de fenda em chapas finas de ágata podem ser obtidos com a utilização de alta velocidades de avanço, baixa distância de afastamento da tubeira em um nível baixo de vazão mássica de abrasivo. Contudo, essa combinação gera um baixo nível de qualidade de percepção visual, levando a uma contradição em termos de projeto da forma de corte. Nesse sentido, deve-se avaliar qual é a variável de resposta mais importante no momento de se realizar o corte, se a qualidade da superfície ou a quantidade de material removido, para então utilizar a seleção mais adequada de parâmetros.

### 4.5.3 Perpendicularidade

A Equação 4.6 apresenta o modelo de regressão para predição do desvio de perpendicularidade em chapas finas de ágata, partir do se construiu o gráfico de colunas mostrado na Figura 4.31. O coeficiente de determinação  $R^2$  para o modelo é de 65%.

$$u = 0,440 + 0,002 V_f + 0,022 \dot{m}_A + 0,029 d_s - 0,014 P - 0,009 \dot{m}_A^2 + 0,013 V_f P \quad (4.6)$$

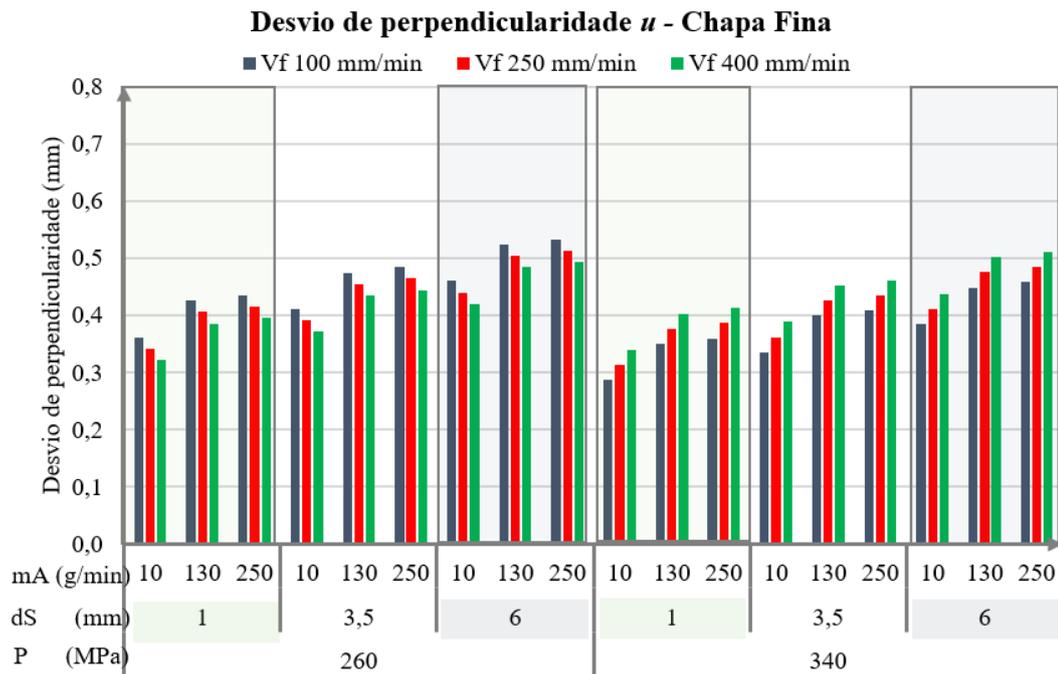


Figura 4.31 – Comportamento do modelo de predição do desvio de perpendicularidade  $u$  no corte com jato abrasivo de água em chapas finas de ágata com espessura média de 5,3 mm.

Verifica-se que existe uma tendência de elevação do desvio de perpendicularidade ( $u$ ) com o aumento dos níveis de vazão mássica de abrasivo ( $\dot{m}_A$ ) e de distância de afastamento da tubeira ( $d_s$ ). Ainda, é possível identificar uma interação entre a pressão de trabalho ( $P$ ) e velocidade de avanço ( $V_f$ ), uma vez que a mudança do nível da pressão modifica a direção do efeito da velocidade de avanço. Para um menor nível de  $P$ , a elevação da velocidade de avanço causa redução do desvio de perpendicularidade, e para um maior  $P$  ocorre o inverso.

Os menores níveis de desvio de perpendicularidade são obtidos em alto nível de pressão de trabalho e baixos níveis de velocidade de avanço, vazão mássica de abrasivo e distância de afastamento da tubeira. Além disso, verifica-se que o desvio de perpendicularidade varia pouco em relação à alteração nos diferentes parâmetros de processo, sendo que seu valor absoluto fica no intervalo de 0,3 a 0,6 milímetros.

A Equação 4.7 apresenta o modelo de regressão para predição desvio de perpendicularidade em chapas grossas de ágata. O coeficiente de determinação  $R^2$  para o modelo é de 26%.

$$u = 0,46 + 0,01 V_f + 0,01 \dot{m}_A + 0,02 d_S - 0,04 P + 0,05 \dot{m}_A d_S \quad (4.7)$$

A Figura 4.32 apresenta o gráfico de colunas elaborado com base no modelo de regressão da Equação 4.7.

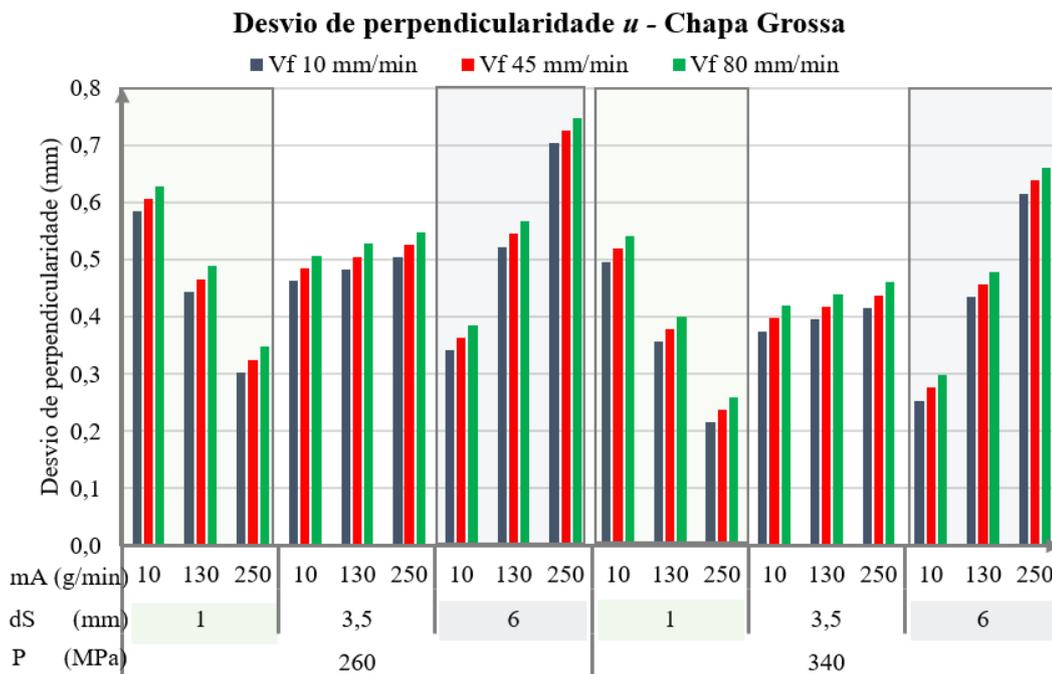


Figura 4.32 – Comportamento do modelo de predição do desvio de perpendicularidade  $u$  no corte com jato abrasivo de água em chapas grossas de ágata com espessura média de 13,7 mm.

Com base no gráfico mostrado na Figura 4.32 verifica-se que, em chapas grossas de ágata, a variação no desvio de perpendicularidade ( $u$ ) possui influência maior da vazão mássica de abrasivo ( $\dot{m}_A$ ) e da distância de afastamento da tubeira ( $d_S$ ), existindo inclusive uma forte interação entre estes fatores. Em níveis menores de distância de afastamento da tubeira, o desvio de reduz com o aumento da vazão mássica de abrasivo, sendo que em níveis maiores de distância de afastamento da tubeira ocorre o inverso. Em níveis intermediários, a vazão mássica deixa de ser um fator significativo, sendo que a pressão de trabalho possui maior influência para a determinação do defeito de perpendicularidade. Já para maiores níveis de distância de afastamento da tubeira, o aumento da vazão mássica de abrasivo contribui para o aumento do

desvio de perpendicularidade. O aumento da velocidade de avanço ( $V_f$ ) sempre contribui para a elevação do desvio de perpendicularidade.

As menores variações do desvio de perpendicularidade ocorrem em níveis médios de distância de afastamento da tubeira, mostrando que a utilização destes níveis torna o processo mais robusto (menor nível de variação absoluta) e previsível quanto a este defeito, o que possibilita maior controle sobre o projeto da forma de corte. Ainda, identifica-se que o desvio de perpendicularidade em chapas grossas de ágata varia de aproximadamente 0,3 a 0,8 milímetros, sendo que a variação é mais acentuada em níveis elevados de distância de afastamento da tubeira.

#### 4.5.4 Rugosidade média

A Equação 4.8 apresenta o modelo de regressão para predição da rugosidade média em chapas finas de ágata usinadas por AWJ, que estão representados na forma de gráficos de colunas na Figura 4.33 e Figura 4.34. O coeficiente de determinação  $R^2$  para o modelo é de 69%.

$$R_a = 4,16 + 0,25 V_f - 0,51 \dot{m}_A - 0,10 P + 0,15 d_S + 1,19 h + 0,30 \dot{m}_A^2 + 1,39 h^2 + 0,21 V_f h - 0,10 \dot{m}_A d_S - 0,51 \dot{m}_A h - 0,24 d_S h \quad (4.8)$$

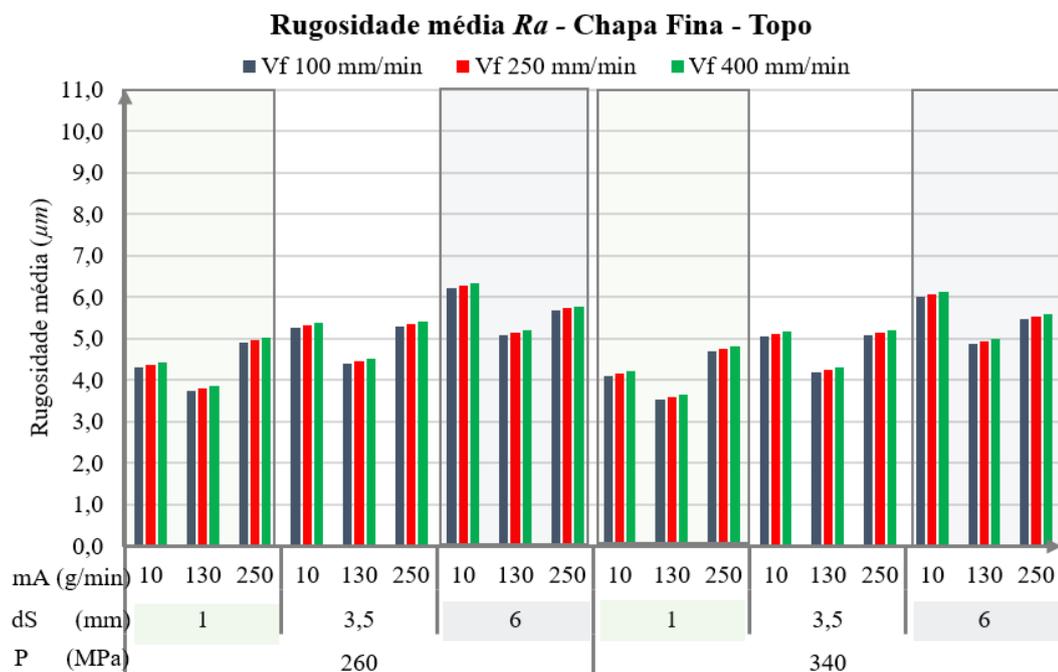


Figura 4.33 – Comportamento do modelo de predição da rugosidade média  $R_a$  no corte com jato abrasivo de água em chapas finas de ágata com espessura média de 5,3 mm, no topo da superfície de corte.

A Figura 4.33 mostra o comportamento do modelo de regressão obtido para a rugosidade média ( $R_a$ ) medida na parte superior (de 0 até 1,5 mm da face de entrada do jato). Neste, observa-se que a rugosidade média é pouco influenciada pela pressão de trabalho ( $P$ ), mas que a distância de afastamento da tubeira ( $d_s$ ), velocidade ( $V_f$ ) e principalmente a vazão mássica de abrasivo ( $\dot{m}_A$ ) são fatores que afetam diretamente em sua resposta. Percebe-se que os menores níveis de rugosidade são obtidos em níveis intermediários de vazão mássica de abrasivo, e que, quanto menor for a distância de afastamento da tubeira e a velocidade de avanço, menor será também a rugosidade.

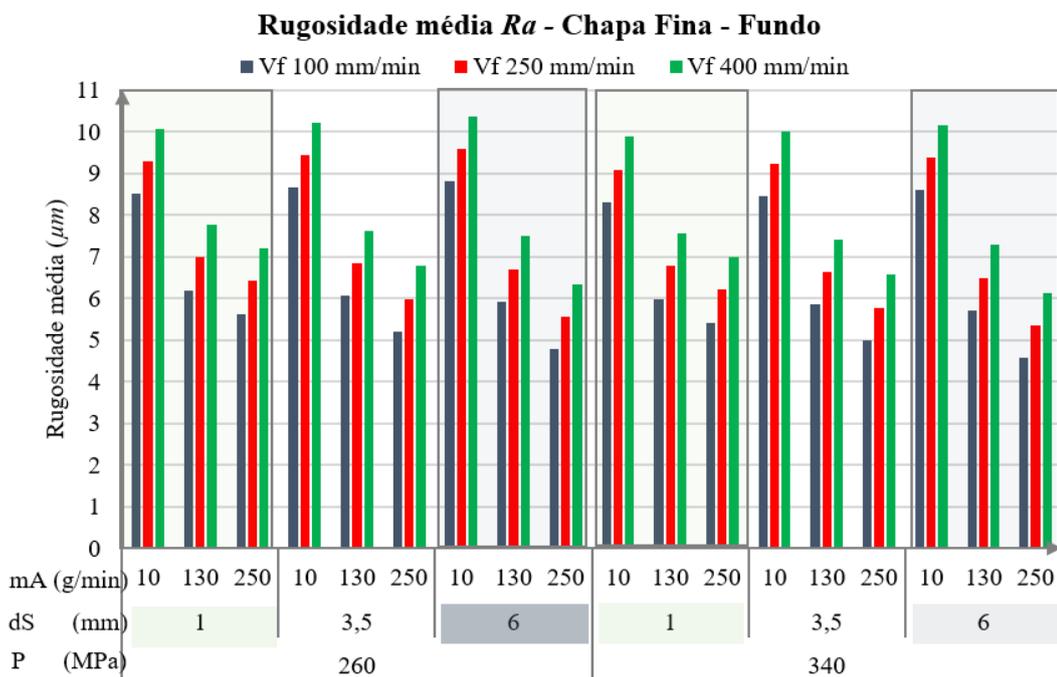


Figura 4.34 – Comportamento do modelo de predição da rugosidade média  $R_a$  no corte com jato abrasivo de água em chapas finas de ágata com espessura média de 5,3 mm, no fundo da superfície de corte.

A Figura 4.34 retrata o comportamento do modelo em relação a medição realizada no fundo da superfície usinada por AWJ (de 4,5 a 6,0 milímetros da superfície de entrada do jato). A pressão de trabalho ( $P$ ) continua tendo pouca influência sobre a resposta final, juntando-se a ela agora a distância de afastamento da tubeira ( $d_s$ ). Salienta-se que a velocidade de avanço ( $V_f$ ) passa a desempenhar um papel importante na rugosidade, sendo que quanto menor for o seu nível, menor também será a rugosidade média resultante. A vazão mássica de abrasivo ( $\dot{m}_A$ ) também possui seu efeito modificado, sendo que os menores níveis de rugosidade são obtidos em maiores níveis de vazão mássica, tendo um efeito mais acentuado. Dessa forma, destaca-se que, conforme se eleva a profundidade de medição, maior é o efeito da velocidade de avanço e

da vazão mássica de abrasivo sobre a rugosidade média em chapas finas de ágata usinadas via AWJ.

Os menores valores de rugosidade média no topo da superfície são obtidos em baixos níveis de distância de afastamento da tubeira combinados com níveis intermediários de vazão mássica de abrasivo (entre 100 a 170 g/min). Ainda, verifica-se que níveis baixos de vazão mássica de abrasivo tendem a gerar uma rugosidade média maior que níveis mais elevados. Percebe-se também que, à medida que a profundidade de medição se eleva, a pressão de trabalho e a distância de afastamento da tubeira tornam-se pouco significativas para a determinação da rugosidade média, uma vez que os gráficos são praticamente iguais em todos os níveis. Assim, a resposta de  $R_a$  é definida basicamente em função da velocidade de avanço e da vazão mássica de abrasivo, sendo que os menores valores são obtidos em níveis altos de vazão mássica de abrasivo e baixos de velocidade de avanço.

A Equação 4.9 apresenta o modelo de regressão para predição da rugosidade média em chapas grossas de ágata usinadas por AWJ. O coeficiente de determinação  $R^2$  para o modelo é de 69%. Os gráficos de colunas da Figura 4.35 e Figura 4.36 apresentam o comportamento do modelo da Equação 4.9 frente a variação nos diferentes parâmetros estudados.

$$R_a = 4,56 + 0,42 V_f + 0,26 \dot{m}_A + 0,60 d_s - 1,40 P + 3,67 h + 0,80 V_f^2 + 1,34 d_s^2 + 1,94 h^2 + 0,82 V_f \dot{m}_A - 0,68 V_f P - 1,64 P h \quad (4.9)$$

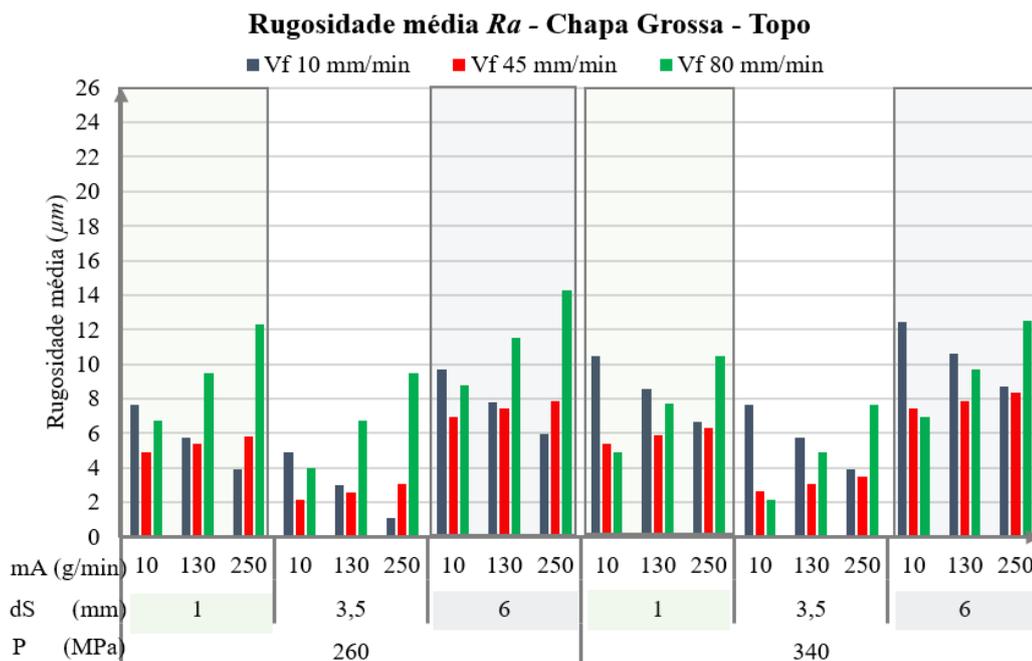


Figura 4.35 – Comportamento do modelo de predição da rugosidade média  $R_a$  no corte com jato abrasivo de água em chapas grossas de ágata com espessura média de 13,7 mm, no topo da superfície de corte.

Com base no gráfico apresentado na Figura 4.35 constata-se que a pressão de trabalho ( $P$ ) e a distância de afastamento da tubeira ( $d_s$ ) possuem efeito considerável sobre a magnitude da rugosidade média ( $Ra$ ) em chapas grossas de ágata. A pressão de trabalho modifica o efeito da velocidade de avanço ( $V_f$ ), tornando o processo menos sensível à sua variação em pressões mais elevadas.

Já a distância de afastamento da tubeira contribui positivamente para a redução da rugosidade média em níveis intermediários (quando  $d_s = 3,5$  mm). Além disso, percebe-se que o aumento da vazão mássica de abrasivo ( $\dot{m}_A$ ) causa elevação da rugosidade média, para todos os casos observados.

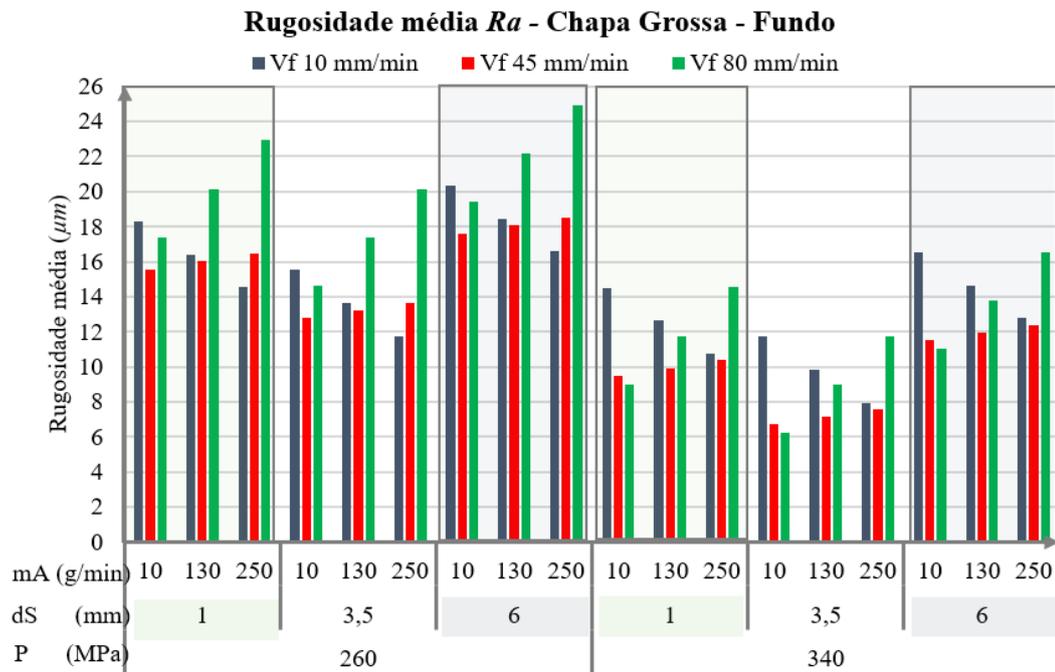


Figura 4.36 – Comportamento do modelo de predição da rugosidade média  $Ra$  no corte com jato abrasivo de água em chapas grossas de ágata com espessura média de 13,7 mm, no fundo da superfície de corte.

O gráfico apresentado na Figura 4.36 mostra que a rugosidade média medida no fundo da superfície se comporta de maneira semelhante à medida no topo, sendo que os níveis mais baixos de rugosidade são obtidos a uma distância de afastamento da tubeira ( $d_s$ ) intermediária (3,5 mm), com pressão de trabalho ( $P$ ) elevada (340 MPa). Percebe-se também que existe uma forte interação entre a velocidade de avanço ( $V_f$ ) e a vazão mássica de abrasivo ( $\dot{m}_A$ ), uma vez que, em níveis baixos de vazão mássica de abrasivo, o aumento da velocidade de avanço causa redução da rugosidade média. Para níveis altos de vazão mássica de abrasivo esse efeito se inverte. Este comportamento é observado em todas as combinações apresentadas. Mais uma

vez, evidencia-se que níveis mais baixos de rugosidade média são obtidos em níveis intermediários de distância de afastamento da tubeira.

#### 4.6 Metodologia de definição de parâmetros

Através dos dados apresentados nas seções 4.4 e 4.5 percebe-se que todos os parâmetros de processo estudados (velocidade de avanço, pressão de trabalho, vazão mássica de abrasivo, distância de afastamento da tubeira e profundidade de medição) possuem alguma influência sobre as variáveis de saída (qualidade, largura de fenda, perpendicularidade, rugosidade e tempo de perfuração) e que este efeito precisa ser conhecido pelos responsáveis pelo planejamento do processo. A compreensão do comportamento de cada fator sobre a qualidade final da superfície usinada é fundamental para a redução dos custos e melhoria das condições de trabalho. Neste sentido, apresentam-se nas Tabelas 4.18 (Chapas Finas) e 4.19 (Chapas Grossas) o resumo dos efeitos de cada um dos parâmetros estudados sobre as variáveis de saída no processo AWJ em ágatas.

Tabela 4.20 – Resumo do comportamento das variáveis de entrada sobre a qualidade, largura de fenda, desvio de perpendicularidade e rugosidade em chapas finas de ágata usinadas por AWJ.

	Velocidade de avanço ( $V_f$ )	Vazão mássica de abrasivo ( $\dot{m}_A$ )	Pressão de Trabalho ( $P$ )	Dist. afast. tubeira ( $d_S$ )
<b>Qualidade (<math>Q_v</math>)</b>	 $\uparrow V_f$ $\downarrow Q_v$	 $\uparrow \dot{m}_A$ $\uparrow Q_v$ $\downarrow$	 $\uparrow P$ $\uparrow Q_v$	 $\uparrow d_S$ $\uparrow Q_v$
<b>Largura fenda (<math>k_w</math>)</b>	 $\uparrow V_f$ $\downarrow k_w$ $\uparrow$	 $\uparrow \dot{m}_A$ $\uparrow k_w$ $\downarrow$	 $\uparrow P$ $\downarrow k_w$	 $\uparrow d_S$ $\uparrow k_w$
<b>Desvio de perpendicularidade (<math>u</math>)</b>	 $\uparrow V_f$ $\uparrow u$	 $\uparrow \dot{m}_A$ $\uparrow u$ $\downarrow$	 $\uparrow P$ $\downarrow u$	 $\uparrow d_S$ $\uparrow u$
<b>Rugosidade média (<math>R_a</math>)</b>	 $\uparrow V_f$ $\uparrow R_a$	 $\uparrow \dot{m}_A$ $\downarrow R_a$ $\uparrow$	 $\uparrow P$ $\downarrow R_a$	 $\uparrow d_S$ $\uparrow R_a$
	Baixo   Alto	Baixo   Alto	Baixo   Alto	Baixo   Alto
	Significativo		Não significativo	Mais significativo

Conforme pode ser percebido nas Tabelas 4.18 e 4.19, a velocidade de avanço ( $V_f$ ) é um fator que contribui ativamente em praticamente todas as variáveis de resposta estudadas. Em geral, a redução da velocidade de avanço causa melhoria na qualidade da superfície usinada,

pois eleva a qualidade de percepção visual ( $Q_v$ ) e reduz a largura de fenda ( $k_w$ ), desvio de perpendicularidade ( $u$ ) e níveis de rugosidade ( $R_a$ ). Contudo, utilizar menores velocidades de avanço causam aumento no custo do processo, sendo necessário estabelecer um limite para esta redução.

Tabela 4.21 – Resumo do comportamento das variáveis de entrada sobre a qualidade, largura de fenda, desvio de perpendicularidade e rugosidade em chapas grossas de ágata usinadas por AWJ.

	Velocidade de avanço ( $V_f$ )	Vazão mássica de abrasivo ( $\dot{m}_A$ )	Pressão de Trabalho ( $P$ )	Dist. afast. tubeira ( $d_s$ )
<b>Qualidade (<math>Q_v</math>)</b>	 $\uparrow V_f$ $\downarrow Q_v$	 $\uparrow \dot{m}_A$ $\uparrow Q_v$ $\downarrow$	 $\uparrow P$ $\uparrow Q_v$	 $\uparrow d_s$ $\uparrow Q_v$ $\downarrow$
<b>Largura fenda (<math>k_w</math>)</b>	 $\uparrow V_f$ $\downarrow k_w$ $\uparrow$	 $\uparrow \dot{m}_A$ $\uparrow k_w$ $\downarrow$	 $\uparrow P$ $\uparrow k_w$	 $\uparrow d_s$ $\uparrow k_w$
<b>Desvio de perpendicularidade (<math>u</math>)</b>	 $\uparrow V_f$ $\uparrow u$	 $\uparrow \dot{m}_A$ $\uparrow u$	 $\uparrow P$ $\downarrow u$	 $\uparrow d_s$ $\uparrow u$
<b>Rugosidade média (<math>R_a</math>)</b>	 $\uparrow V_f$ $\downarrow R_a$ $\uparrow$	 $\uparrow \dot{m}_A$ $\uparrow R_a$	 $\uparrow P$ $\downarrow R_a$	 $\uparrow d_s$ $\downarrow R_a$ $\uparrow$
	Baixo   Alto	Baixo   Alto	Baixo   Alto	Baixo   Alto
	Significativo		Não significativo	Mais significativo

Nesse sentido, a pressão de trabalho ( $P$ ) atua de maneira semelhante à velocidade de avanço, sendo que o uso de pressões elevadas contribuem para a melhoria da qualidade global da superfície usinada. Além disso, a utilização de pressões elevadas permite também usar velocidades de avanço mais elevadas, o que contribui para a redução dos custos diretos do processo. Apesar disso, os níveis mais elevados de pressão podem acelerar o desgaste dos componentes do equipamento, podendo gerar transtornos em relação à manutenção e custos indiretos.

O parâmetro de processo que se mostrou com menor nível de influência para a qualidade final do processo foi a distância de afastamento da tubeira ( $d_s$ ), sendo que o seu maior efeito está sobre a largura de fenda. Isto se explica pelo fato de que, quanto maior a distância entre a peça e a saída do tubo de mistura, maior o diâmetro do jato abrasivo.

A vazão mássica de abrasivo ( $\dot{m}_A$ ) mostra um comportamento que varia principalmente em relação à espessura da peça a ser cortada. Em chapas finas, mostrou-se significativa e de

comportamento não linear para praticamente todas as respostas estudadas. Em chapas finas, observa-se que, ao aumentar a vazão mássica de abrasivo, tem-se a diminuição da rugosidade e o aumento da qualidade, da largura de fenda e do desvio de perpendicularidade. Já para chapas grossas, essa influência diminui e torna-se significativa apenas para a largura de fenda. Dessa forma, tem-se que, em chapas de maior espessura, a utilização de maior quantidade de abrasivo não contribui de maneira significativa para a melhoria da qualidade global do corte.

Embora todas estas observações sejam importantes e contribuam para uma melhor compreensão dos efeitos das diferentes variáveis de entrada sobre a qualidade do processo AWJ em ágata, a sua conversão em melhoria efetiva para a prática do processo depende da utilização de uma metodologia que permita avaliar quais os melhores parâmetros para a qualidade de processo desejada. Assim, elaborou-se uma proposta de metodologia de definição de parâmetros de processo (Figura 4.37) em função dos modelos de regressão obtidos e apresentados anteriormente.

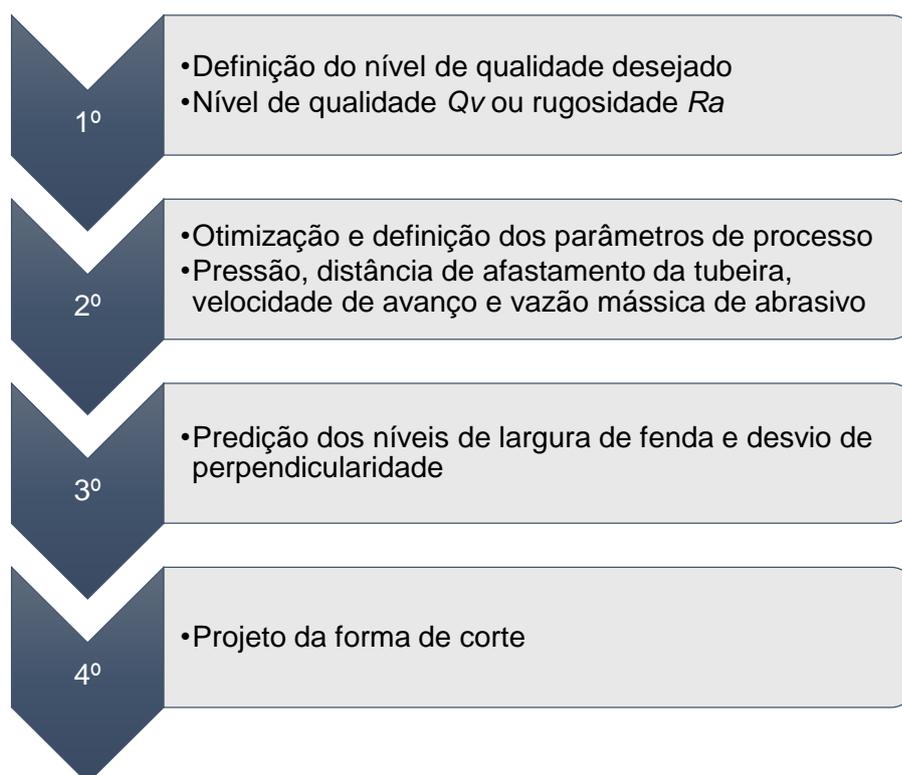


Figura 4.37 – Metodologia de seleção de parâmetros de processo AWJ em ágata.

Primeiramente, define-se um nível de qualidade desejado para o corte, que pode ser estabelecido em termos do critério de qualidade de percepção visual ( $Q_v$ ) ou da rugosidade máxima permitida ( $R_a$ ). A partir desta definição, especificam-se os parâmetros de processo (pressão de trabalho, velocidade de avanço, vazão mássica de abrasivo e distância de

afastamento da tubeira) que atendam à qualidade desejada. Em seguida, estes parâmetros são utilizados para realizar a predição do nível de largura de fenda e desvio de perpendicularidade, o que permite realizar o projeto da forma de corte através da compensação do material removido na trajetória. Esta metodologia pode ser implementada em softwares computacionais, o que permite maior agilidade na tomada de decisões e agilidade do processo. Neste trabalho, foram produzidas duas aplicações implementadas em MatLab, através da criação de interfaces gráficas (ambiente GUIDE), apresentadas nas Figura 4.38 e Figura 4.39.

The screenshot shows a MATLAB GUI titled 'OtimizadorAWJV2'. It is divided into two main sections: 'Propriedades de Entrada' (Input Properties) and 'Propriedades de Saída' (Output Properties).

**Propriedades de Entrada:**

- Material:** Dropdown menu set to 'Ágata'.
- Espeçura:** Dropdown menu set to 'Chapa Fina'.
- Qualidade desejada:** Dropdown menu set to '80'.
- Pressão de Trabalho:**
  - Pressão Mínima: 260 MPa
  - Pressão Máxima: 340 MPa
  - Intervalo: 10 MPa
- Vazão de Abrasivo:**
  - Vazão Mínima: 10 g/min
  - Vazão Máxima: 250 g/min
  - Intervalo: 10 g/min
- Velocidade de Avanço:**
  - Velocidade Mínima: 100 mm/min
  - Velocidade Máxima: 400 mm/min
  - Intervalo: 5 mm/min
- Curso Hora:** Input field set to 250 R\$/Hora.
- Distância de Standoff:**
  - Distância Mínima: 2 mm
  - Distância Máxima: 4 mm
  - Intervalo: 1 mm
- CALCULAR:** A large blue button to execute the optimization.

**Propriedades de Saída:**

- Parâmetros Otimizados:**
  - Velocidade Avanço: 220.551 mm/min
  - Vazão Abrasivo: 190 g/min
  - Distância Standoff: 4 mm
  - Pressão Trabalho: 340 MPa
- Previsão Parâmetros:**
  - Largura fenda: 1.47814 mm
  - Perpendicularidade: 0.442146 mm
  - Custo relativo: 21.4765 R\$ / 1000mm
  - Ra máximo: 5.78203 um
  - Rz máximo: 33.5793 um
  - Tempo perfuração: 2.14928 seg
- Gráfico:** A 2D plot with both axes ranging from 0 to 1. The plot area is currently empty.

Figura 4.38 – Implementação em MATLAB da metodologia de seleção de parâmetros do processo AWJ em ágata.

The screenshot shows a MATLAB GUI titled 'PrevisaoAWJV1'. It is divided into two main sections: 'Propriedades de Entrada' (Input Properties) and 'Propriedades de Saída' (Output Properties).

**Propriedades de Entrada:**

- Material:** Dropdown menu set to 'Ágata'.
- Espeçura:** Dropdown menu set to 'Chapa Fina'.
- Pressão de Trabalho:** Input field set to 260 MPa.
- Vazão mássica de abrasivo:** Input field set to 250 g/min.
- Velocidade de avanço:** Input field set to 400 mm/min.
- Distância de standoff:** Input field set to 2 mm.
- Custo Hora:** Input field set to 250 R\$/Hora.
- Perímetro:** Input field set to 1000 mm.
- CALCULAR:** A large blue button to execute the prediction.

**Propriedades de Saída:**

- Qualidade: 78.54 %
- Largura fenda: 1.313 mm
- Perpendicularidade: 0.414 mm
- Custo corte: 10.41 R\$
- Ra: 7.027 um
- Tempo perfuração: 1.476 seg

Figura 4.39 – Implementação em MATLAB dos modelos de predição de parâmetros do processo AWJ para chapas finas e grossas de ágata.

A aplicação apresentada na Figura 4.38 foi denominada de “OtimizadorAWJ”. Nesta, insere-se um intervalo de parâmetros de processo desejado, bem como selecionam-se o material (ágata), a espessura (chapa fina ou grossa), os intervalos de cálculo desejados e o custo por hora do processo. Seleciona-se o nível de qualidade de percepção visual ( $Q_v$ ) desejado. A partir dos dados de entrada, a aplicação calcula o custo para todas as combinações inseridas e indica a combinação de parâmetros de entrada de processo de menor custo, bem como a previsão dos valores referentes à largura de fenda, ao desvio de perpendicularidade, à rugosidade e ao tempo de perfuração. Para calcular o custo relativo para cada uma das combinações considerou-se uma trajetória de corte de 1000 mm, de acordo com a equação 4.10:

$$cCorte = tC \dot{m}_A cAb + tC cH/60 \quad (4.10)$$

Onde:

- $tC$  - tempo necessário cortar 1000 mm ( $1000 \text{ mm}/Vf$ ), em mm/min;
- $cAB$  – custo por grama de abrasivo, em R\$;
- $\dot{m}_A$  – vazão mássica de abrasivo, em g/min;
- $cH$  – custo hora do processo, em R\$.

Já a aplicação mostrada na Figura 4.39, denominada de PrevisaoAWJv1 realiza a aplicação direta dos modelos de regressão apresentados na seção 4.5. Nesta, realiza-se a seleção do material e espessura desejadas e efetua-se a inserção manual dos parâmetros de processo. A partir destes dados, a aplicação calcula e mostra as previsões para o nível de qualidade  $Q_v$ , largura de fenda, desvio de perpendicularidade, rugosidade na parte inferior da superfície, tempo de perfuração e o custo do corte, calculado diretamente pela relação tempo de corte/custo-hora.

A implementação destas aplicações permite realizar a utilização de todos os resultados obtidos durante este trabalho de maneira simples, rápida e efetiva, possibilitando maior agilidade e confiabilidade de processo ao operador. Desta forma, foi possível viabilizar a previsão dos principais fatores que contribuem para o projeto da forma de corte (largura de fenda e desvio de perpendicularidade) e também do nível de qualidade esperado para uma dada combinação de parâmetros.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Este capítulo apresenta as considerações finais do presente trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros.

### **5.1 Ensaios preliminares**

A execução dos ensaios preliminares foi fundamental para o desenvolvimento do presente estudo, uma vez que permitiu iniciar a compreensão sobre o comportamento de algumas propriedades do processo AWJ. Esta etapa do trabalho gerou algumas conclusões parciais:

- A variação dos parâmetros de processo influencia diretamente na rugosidade final da superfície usinada por AWJ.
- O crescimento da rugosidade se comporta de maneira semelhante em peças de espessuras diferentes. Ao realizar o experimento com chapas de ágata com 5 mm e 10 mm de espessura, constatou-se que a rugosidade varia ao longo da superfície usinada de maneira semelhante nas duas espessuras de material. Assim, o perfil de acabamento varia com a distância da superfície de entrada do jato abrasivo, mas não é influenciado diretamente pela espessura do material a ser usinado.
- A profundidade da superfície é o fator de maior influência na rugosidade final, ou seja, a espessura total da peça deve ser considerada como base para a seleção dos parâmetros de processo adequados para o nível de qualidade desejada.
- A velocidade de avanço é mais significativa que a vazão mássica de abrasivo para as espessuras ensaiadas. A rugosidade sempre cresce com o aumento da velocidade de avanço; no entanto, a elevação da vazão mássica de abrasivo contribui para a redução da rugosidade até um determinado valor, causando o seu crescimento a partir deste ponto.

De fato, o estudo preliminar mostrou-se de extrema importância para o desenvolvimento deste trabalho, uma vez que permitiu definir as variáveis de interesse bem como seus níveis de variação, além de possibilitar a comparação com os dados apresentados por diferentes autores.

### **5.2 Considerações sobre os objetivos**

Em relação aos objetivos propostos para o desenvolvimento deste trabalho, destacam-se os seguintes pontos:

- Um estudo aprofundado sobre os fundamentos do processo e a influência das diferentes variáveis sobre a qualidade final da superfície usinada foi realizado, possibilitando um entendimento claro sobre o estado da técnica e as dificuldades e divergências encontradas por diferentes pesquisadores.
- Vários estudos e modelos para predição de parâmetros e qualidade da superfície usinada foram encontrados na literatura especializada [Zeng, 2007; Hlávác, 2009; Hlavác, et al., 2009; Ramulu e Arola, 1994; Burnham e Kim, 1989; Kovacevic, 1991] e outros. Modelos conceituais buscam relacionar as variáveis de maneira generalizada, mas acabam tendo de recorrer a constantes obtidas experimentalmente e a condições de processo, o que dificulta a sua aplicação. Já os modelos empíricos, mesmo obtidos sob condições semelhantes, ficam restritos ao seu campo de validade, ou seja, às condições específicas de materiais e intervalos de variáveis a que foram desenvolvidos. Dessa forma, para cada novo conjunto material-máquina-condições de processo, é necessário desenvolver um novo procedimento experimental.
- Foram encontradas abordagens diferentes para a determinação da qualidade final da superfície usinada via AWJ, sendo que nenhuma delas é plenamente aceita pelos pesquisadores em virtude de sua subjetividade e difícil aplicação prática. Assim, o desenvolvimento de um novo critério de classificação de qualidade que possibilite utilizar uma abordagem quantitativa pode permitir a sua popularização por parte dos diferentes usuários da tecnologia.
- Um estudo experimental sobre o processo AWJ em ágata foi executado, o que proporcionou a compreensão do efeito das principais variáveis de processo (velocidade de avanço, vazão mássica de abrasivo, pressão de trabalho e distância de afastamento da tubeira) sobre a qualidade da superfície usinada, a largura de fenda, o desvio de perpendicularidade e a rugosidade resultantes do corte de ágata. Um resumo de todos os efeitos foi apresentado nas Tabelas 4.18 e 4.19.
- Adicionalmente, realizou-se um estudo piloto sobre o efeito de variáveis de processo sobre o tempo de perfuração via AWJ em ágata, o que permitiu obter um modelo de regressão para prever o tempo necessário para realizar a perfuração em diferentes espessuras do material.
- Um estudo visual possibilitou identificar que a região de transição entre zona suavizada e ondulada possui, possui valores médios de Ra em torno de 5,7  $\mu\text{m}$ , sendo possível estabelecer como limite de qualidade para a zona suavizada o valor de 6,3  $\mu\text{m}$  (classe de qualidade N9 – ABNT - NBR 8404/84).

- Através da determinação da rugosidade na região de transição aplicou-se o critério de qualidade de percepção visual ( $Q_V$ ), que permite relacionar, de maneira quantitativa, a relação existente entre a porção da superfície usinada sem a presença de estrias ou defeitos visíveis com a espessura total da peça.
- O desenvolvimento do estudo experimental também possibilitou desenvolver modelos empíricos que permitem prever as diferentes variáveis de resposta estudadas. Através destes modelos é possível selecionar os parâmetros mais adequados para cada nível de qualidade desejada, bem como realizar otimizações do processo, com vistas a reduzir custos o maximizar a qualidade.
- A implementação dos modelos de regressão em ferramentas computacionais permite ao operador um maior controle sobre o processo, uma vez que ao poder prever a qualidade, a largura de fenda, a rugosidade e o desvio de perpendicularidade resultantes do corte, o planejamento da trajetória de corte e a decisão sobre os melhores parâmetros de entrada do equipamento tornam-se muito mais simples, agilizando o trabalho e entregando produtos de maior qualidade.

Neste sentido, o desenvolvimento deste trabalho mostrou ser importante para a evolução do processo de corte via jato de água e abrasivo (AWJ). O desenvolvimento de um método de avaliação da qualidade através da aplicação do critério de qualidade de percepção visual mostrou-se de aplicação simples e prática, facilitando a utilização de métodos de otimização de parâmetros para um nível de qualidade pré-determinado de superfície e material.

### 5.3 Conclusões

As principais conclusões geradas após o desenvolvimento deste trabalho são listadas a seguir:

- A qualidade da superfície usinada via AWJ em ágata pode ser classificada por um critério de qualidade de percepção visual ( $Q_V$ ), adimensional, que varia de 0 a 100.
- O parâmetro  $Q_V$  representa, de forma simplificada, um indicativo percentual sobre a relação entre a porção de zona suavizada da superfície usinada e a espessura total da peça, permitindo avaliar de forma quantitativa a qualidade da superfície. Através deste critério, o comparativo entre duas superfícies diferentes torna-se simples e direto.

- A pressão de trabalho, a velocidade de avanço e a vazão mássica de abrasivo são os parâmetros que possuem maior influência sobre a qualidade  $Q_V$  da superfície usinada via AWJ.
- A vazão mássica de abrasivo possui efeito não linear sobre  $Q_V$ , sendo que a elevação de  $\dot{m}_A$  tende a gerar aumento de  $Q_V$  até um determinado ponto, e ainda possui influencia estatisticamente significativa em outros parâmetros, como a largura de fenda, a perpendicularidade, a rugosidade e o custo do processo.
- O nível de qualidade  $Q_V$  pode ser modelado estatisticamente como função da pressão de trabalho, da velocidade de avanço, da distância de afastamento da tubeira e da vazão mássica de abrasivo, sendo que a partir de um nível determinado de  $Q_V$  é possível selecionar os melhores parâmetros de processo a serem utilizados.
- O desvio de perpendicularidade e a largura de fenda podem ser modelados a partir dos parâmetros de processo através de equações empíricas. A partir destas equações, pode-se prever as suas respostas e compensar os desvios gerados no projeto da forma a ser usinada via AWJ, a fim de melhorar a confiabilidade do processo.
- A implementação de uma metodologia sistemática de otimização e seleção de parâmetros permite ao operador maior controle sobre o processo.

#### 5.4 Sugestões para trabalhos futuros

Apesar de todo o avanço e conhecimento sobre o processo AWJ obtido no desenvolvimento deste trabalho, enfatiza-se que ainda existem muitos pontos a serem investigados. Neste sentido, destacam-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Desenvolver estudos sobre outros parâmetros que podem afetar a qualidade da peça fabricada, como o desvio de canto (mudança na direção da trajetória de corte), bem como o nível de confiabilidade dimensional do processo.
- Aprofundar o estudo sobre a etapa de perfuração que permita prever as condições geométricas (diâmetro, circularidade, conicidade).
- Desenvolver estudos sobre a influência das propriedades do material (ágata) sobre a qualidade do processo, como a direção do corte em relação ao bandamento, as regiões macro e micro cristalina, a origem e o tratamento prévio do material, dentre outros.
- Replicar a metodologia de experimentação utilizada neste trabalho para outros materiais, criando um banco de dados acerca do processo AWJ.

- Desenvolver estudos sobre a possibilidade de reutilização do material abrasivo, bem como de seu efeito sobre a qualidade e a produtividade do processo.
- Desenvolver estudos sobre a utilização de outros materiais abrasivos que possibilitem a reutilização de rejeitos do setor produtivo da ágata como matéria prima para o processo AWJ, por exemplo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR ISO 4288. **Especificações Geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e Procedimentos para avaliação de rugosidade**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2008.

ABNT-NBR 8404. **Indicação do estado de superfícies em desenhos técnicos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. p. 10. 1984.

AKKURT, A. The effect of material type and plate thickness on drilling time of abrasive water jet drilling process. **Materials and Design**, vol. 30, p. 810-815, ISSN 0261-3069. 2009.

AKKURT, A. Cut front geometry characterization in cutting applications of brass with abrasive water jet. **Journal of Materials Engineering and Performance**, vol. 19, p. 599-606, ISSN 1059-9495. 2010.

AKKURT, A. et al. Effect of feed rate on surface roughness in abrasive waterjet cutting applications. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 147, p. 389-396, ISSN 0924-0136. 2004.

AKKURT, A. et al. Effect of feed rate on surface roughness in abrasive waterjet cutting applications. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 147, p. 389-396, ISSN 0924-0136. 2004.

ALBERDI, A. et al. Effect of process parameter on the kerf geometry in abrasive water jet milling. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 51, p. 467-480, ISSN 1433-3015. 2010.

ALBERDI, A. et al. Composite Cutting with Abrasive Water Jet. **Procedia Engineering**, vol. 63, p. 421-429, ISSN 1877-7058. 2013.

AYDIN, G. Recycling of abrasives in abrasive water jet cutting with different types of granite. **Arabian Journal of Geosciences**, vol. 7, p. 4425-4434, ISSN 1866-7538. 2014.

AYDIN, G.; KARAKURT, I.; AYDINER, K. An investigation on surface roughness of granite machined by abrasive waterjet. **Bulletin of Materials Science**, vol. 34, p. 985-992, ISSN 0973-7669. 2011.

AYDIN, G.; KARAKURT, I.; AYDINER, K. Prediction of the Cut Depth of Granitic Rocks Machined by Abrasive Waterjet (AWJ). **Rock Mechanics and Rock Engineering**, vol. 43, p. 1223-1235, 2012. ISSN 1434-453X.

BABU, M. K.; CHETTY, O. K. A study on recycling of abrasives in abrasive water jet machining. **Wear**, vol. 254, p. 763-773, ISSN 0043-1648. 2003.

BARP, D.; NEIS, P. D.; FERREIRA, N. F. Contribuição ao Estudo do Processo de Corte de Ágata por Jato d'Água em Formas Complexas. **Design e Tecnologia**, Porto Alegre, vol. 01, ISSN 2178-1974. 2011.

BATISTI, V. S.; TATSCH, A. L. **O APL gaúcho de gemas e joias: infra-estrutura produtiva, educacional e institucional**. São Leopoldo/RS. 2008.

BURNHAM, C. D.; KIM, T. J. **Statistical characterization of surface finish produced by a high pressure abrasive water jet**. Proceedings 5th American Water Jet Conference. St. Louis. p. 165-175. 1989.

ÇAYDAS, U.; HASÇALIK, A. A study on surface roughness in abrasive waterjet machining process using artificial neural networks and regression analysis method. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 202, p. 574-582, ISSN 0924-0136. 2008.

ĆOJBAŠIĆ, Ž. et al. Surface roughness prediction by extreme learning machine constructed with abrasive water jet. **Precision Engineering**, vol. 43, p. 86-92, ISSN 0141-6359. 2016.

COSTENARO, A. **Indústrias de Pedras Preciosas: Um Estudo dos Fatores Competitivos em Empresas de Soledade-RS**. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, p. 95. 2005.

CURHAM, J.; REUBER, M.; KIM, T. J. Force control of surface finish in abrasive waterjet cutting, vol. 41, p. 31-36, 1989.

DEAM, R. T.; LEMMA, E.; AHMED, D. H. Modelling of the abrasive water jet cutting process. **Wear**, vol. 257, p. 877-897, ISSN 0043-1648. 2004.

DERIS, A.; ZAIN, A.; SALLEHUDDIN, R. Hybrid GR-SVM for prediction of surface roughness in abrasive water jet machining. **Meccanica**, vol. 48, p. 1937-1945, ISSN 1572-9648. 2013.

DUARTE, J. P. et al. O jacto de água abrasivo: uma ferramenta complementar. **Revista de Metalurgia**, vol. 34(2), p. 217-219, 1998.

DUFLOU, J. R.; KRUTH, J. P.; BOHEZ, E. L. Contour cutting of pre-formed parts with abrasive waterjet using 3-axis nozzle control. **Journal of Materials Processing Technology**, 38-43. 2001.

ENGIN, I. C. A correlation for predicting the abrasive water jet cutting depth for natural stones. **South African Journal Science**, vol. 108, p. 9/10, ISSN 1996-7489. 2012.

ENGIN, I. C.; BAYRAM, F.; YASITLI, N. E. Experimental and statistical evaluation of cutting methods in relation to specific energy and rock properties. **Rock mechanics and rock engineering**, vol. 46, p. 755-766, ISSN 1434-453X. 2013.

FLOW WATER JET. Flow Water Jet. **Tecnologia da Bomba**, 2016. Disponível em: <[www.flowwaterjet.com.br/Bombas/Visao-gera](http://www.flowwaterjet.com.br/Bombas/Visao-gera)>. Acesso em: 14 out. 2016.

FREDIN, J.; JÖNSSON, A. Experimentation on Piercing with Abrasive Waterjet. **International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering**, vol. 5, 2011.

FRONDEL, C. **The system of mineralogy of Dana**. 7th. ed. New York: John Wiley, 1962.

GRYC, R. et al. Correlation of pure and abrasive waterjet cutting of rocks. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, vol. 65, p. 149-152, ISSN 1365-1609. 2014.

GUO, N. S.; LOUIS, H.; MEIER, G. **Surface structure and kerf geometry in abrasive waterjet cutting**: formation and optimization. Proceedings of the 7th American Water Jet Conference. Seattle, Washington. p. 1-25. 1993.

GUPTA, V. et al. Minimization of Kerf Taper Angle and Kerf Width Using Taguchi's Method in Abrasive Water Jet Machining of Marble. **Procedia Materials Science**, vol. 6, p. 140-149, ISSN 2211-8128. 2014.

HAJDAREVIC, D. B. et al. Experimental Study on Surface Roughness in Abrasive Water Jet Cutting. **Procedia Engineering**, vol. 100, p. 394-399, ISSN 1877-7058. 2015.

HARTMANN, L. A. Minerais estratégicos do sul do Brasil: geologia de geodos de ametista e ágata. In: HARTMANN, L. A.; SILVA, J. T. D. **Tecnologias para o setor de gemas, joias e mineração**. Porto Alegre: IGEO/UFRGS, p. 30-39. 2010.

HASHISH, M. **An improved model for erosion by solid particle impact**. Proceedings 7th Int. Con Erosion by Liquid and Solid Impact, Cavendish Lab. Cambridge. p. 66.1-66.9. 1987.

HASHISH, M. Prediction of depth of cut in abrasive waterjet (AWJ) machining. **MD**, vol. 3, p. 65-82, 1987.

HASHISH, M. Visualization of the abrasive waterjet cutting process. **Experimental Mechanics**, vol. 28, p. 159-169, ISSN 0014-4851. 1988.

HINES, W. W. et al. **Probabilidade e estatística na engenharia**. Rio de Janeiro: LTC, ISBN 978-85-216-1474-6. 2011.

HL MINERAIS. **HL Minerais**, 2018. Disponível em: <<http://hlminerais.com.br/>>. Acesso em: 15 mar. 2018.

HLÁVAC, L. **Theoretical model of abrasive liquid jet**. Transactions of the VSB-Technical University of Ostrava. p. 51-62. 2001.

HLÁVAC, L. Investigation of the abrasive water jet trajectory curvature inside the kerf. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 209, p. 4154-4161, ISSN 0924-0136. 2009.

HLAVÁČ, L. M. et al. Experimental method for the investigation of the abrasive water jet cutting quality. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 209, p. 6190-6195, ISSN 0924-0136. 2009.

HLÁVAC, L.; STRNADEL, B.; KALICINSKY, J. The model of product distortion in AWJ cutting. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 62, p. 157-166, ISSN 1433-3015. 2011.

HLOCH, S.; VALÍČEK, J. Topographical anomaly on surfaces created by abrasive waterjet, vol. 59(5), p. 593-604, ISSN 1433-3015. 2012.

IBGM. **O Setor de Gemas e Joias no Brasil**. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEMAS E METAIS PRECIOSOS. Brasília. 2008.

ISO 1770. **ISO 1770 Contact-free cutting - Water jet cutting - Geometrical product specification and quality**. International Organization for Standardization. 2010.

ISO 9013. **ISO 9013:2017 - Thermal cutting - Classification of thermal cuts - Geometrical product specification and quality tolerances**. International Organization for Standardization. Vernier, Geneva, Switzerland, p. 31. (ISO 9013:2017(E)). 2017.

JUCHEM, P. L. et al. Potencial Gemológico Da Região Sul Do Brasil. **I Seminário sobre Design e Gemologia de Pedras, Gemas e Joias do Rio Grande do Sul**, Soledade, 2009.

JUCHEM, P. L.; BRUM, T. M. Geologia e Mineralogia. In: AGOSTINI, I. M. **Ágata do Rio Grande do Sul**. Brasília: DNPM, p. 25-35. 1998.

JUCHEM, P. L.; BRUM, T. M.; RIPOLL, V. O Laboratório de Gemologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. In: HARTMANN, L. A.; SILVA, J. T. **Tecnologias para o setor de gemas e joias**. Porto Alegre: IGEO/UFRGS, p. 133-147. 2010.

KARAKURT, I.; AYDIN, G.; AYDINER, K. An Experimental Study on the Depth of Cut of Granite in Abrasive Waterjet Cutting. **Materials and Manufacturing Processes**, vol. 27, p. 538-544, ISSN 1042-6914. 2012.

KARAKURT, I.; AYDIN, G.; AYDINER, K. An investigation on the kerf width in abrasive waterjet cutting of granitic rocks. **Arabian Journal of Geosciences**, vol. 7, p. 2923-2932, ISSN 1866-7538. 2014.

KECHAGIAS, J.; PETROPOULOS, G.; VAXEVANIDIS, N. Application of Taguchi design for quality characterization of abrasive water jet machining of TRIP sheet steels. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 62, p. 635-643, ISSN 1433-3015. 2012.

KHAN, A. A.; HAQUE, M. M. Performance of different abrasive materials during abrasive water jet machining of glass. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 191, p. 404-407, ISSN 0924-0136. 2007.

KOK, M.; KANCA, E.; EYERCIUGLU, O. Prediction of surface roughness in abrasive waterjet machining of particle reinforced MMCs using genetic expression programming. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 55, p. 955-968, ISSN 1433-3015. 2011.

KOLAHAN, F.; KHAJAVI, A. A statistical approach for predicting and optimizing depth of cut in AWJ machining for 6063-T6 Al alloy. **International Journal of Mechanical Systems Science and Engineering**, vol. 2, p. 143-146, ISSN 2455-7412. 2010.

KOVACEVIC, R. Surface texture in abrasive waterjet cutting. **Journal of Manufacturing Systems**, vol. 10, p. 32-40, ISSN 0278-6125. 1991.

KRAJCARZ, D.; BAŃKOWSKI, D.; MLYNARCZYK, P. The effect of traverse speed on kerf width in AWJ cutting of ceramic tiles. **Procedia Engineering**, 469-473. 2017.

LI, H.; WANG, J. An experimental study of abrasive waterjet machining of Ti-6Al-4V. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 81, p. 361-369, ISSN 1433-3015. 2015.

LIMA, C. E. A. E. et al. Study of influence of traverse speed and abrasive mass flowrate in abrasive water jet machining of gemstones. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 83(1), p. 77-87, ISSN 1433-3015. 2016.

MICHELIN, C. R. L. **Ágata do distrito mineiro de Salto do Jacuí (Rio Grande do Sul, Brasil) : uma caracterização com base em técnicas estratigráficas, petrográficas, geoquímicas e isotópicas**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Porto Alegre. 2014.

MICHELIN, C. R. L. et al. Ágata do Distrito Mineiro do Salto do Jacuí, Rio Grande do Sul. In: HARTMANN, L. A.; SILVA, J. T. D.; DONATO, M. **Tecnologia e inovação em gemas, joias e mineração**. Porto Alegre: IGEO/UFRGS, p. 22-29. ISBN 978-85-61424-44-2. 2014.

MITUTOYO. Produtos - Rugosímetros. **Mitutoyo**, 2018. Disponível em: <<http://www.mitutoyo.com.br/novosite/produtos/produtos/08forma/rugosímetros.html>>. Acesso em: 05 ago. 2018.

MOMBER, A. W.; KOVACEVIC, R. **Principles of Abrasive Water Jet Machining**. 1. ed. Springer-Verlag London, ISBN 978-1-4471-1572-4. 1998.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 8ª. ed. Wiley, 752 p. ISBN 1118146921. 2012.

OMAX CORPORATION. Piercing methods ia abrasive waterjet machining, 2017. Disponível em: <[www.omax.com.br/news/blog](http://www.omax.com.br/news/blog)>. Acesso em: 27 jul. 2017.

ORBANIC, H. et al. An instrument for measuring abrasive waterjet diamete. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, vol. 49, p. 843-849, ISSN 0890-6955. 2009.

PALLEDA, M. A study of taper angles and material removal rates of drilled holes in the abrasive water jet machining process. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 189, p. 292-295, ISSN 0924-0136. 2007.

PEREC, A. et al. Feasibility study on the use of fractal analysis for evaluating the surface quality generated by waterjet. **Tehnivcki vjesnik**, vol. 22, p. 879-883, 2015.

PRASAD, K. S.; CHAYTANIA, G. A REVIEW ON CURRENT RESEARCH TRENDS IN ABRASIVE WATER JET MACHINING. **International Research Journal of Engineering and Technology**, 4, n. 6, jun. 3264-3270. 2017.

RAMULU, M.; AROLA, D. A study of kerf characteristics in abrasive waterjet machining of graphite/epoxy composites. **MD PED ASME**, vol. 45/66, p. 125-160, 1993.

RAMULU, M.; AROLA, D. The influence of abrasive waterjet cutting conditions on the surface quality of graphite/epoxy laminates. **International Journal of Machine Tools Manufacturing**, vol. 34, p. 295-313, ISSN 0890-6955. 1994.

ROISENBERG, A.; VILASBÔAS, F. D. S. Impacto ambiental do beneficiamento de ágatas na região de Soledade/RS. In: N: HARTMANN, L. A.; SILVA, J. T. **Tecnologias para o setor de gemas e joias**. Porto Alegre: IGEO/UFRGS, p. 193-204. 2010.

SAURWEIN, A. C. **Center feeding water jet/abrasive cutting nozzle assembly**. US Patent 4,545,157, out. 1985.

SCHUMAN, W. **Guia dos Minerais**. 2<sup>a</sup>. ed. Colação Habitat, 2001.

SCHUMANN, W. **Gemas do Mundo**. Disal Editora, 280 p. ISBN 8589533573. 2006.

SCHWARTZENTRUBER, J.; PAPINI, M. Abrasive waterjet micro-piercing of borosilicate glass. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 219, p. 143-154, ISSN 0924-0136. 2015.

SELVAN, M. C. P.; RAJU, N. M. S.; SACHIDANANDA, H. Effects of process parameters on surface roughness in abrasive waterjet cutting of aluminium. **Frontiers of Mechanical Engineering**, vol. 7, p. 439-444, ISSN 2095-0241. 2012.

SHIMADZU DO BRASIL. inspeXio SMX-90CT. **Shimadzu - Excellence in science**, 2018. Disponível em: <<http://www.shimadzu.com.br/analitica/produtos/ndi/smx-90ct-1.shtml>>. Acesso em: 05 ago. 2018.

SIDDIQUI, T. U.; SHUKLA, M. Modeling of Depth of Cut in Abrasive Waterjet Cutting of Thick Kevlar-Epoxy Composites. **Key Engineering Materials**, vol. 443, p. 423-427, ISSN 1662-9795. 2010.

SILVA, K. R. **Design e Tecnologia: Fabricação de anéis em Ágata por corte a jato d'água**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Programa de Pós Graduação em Design e Tecnologia. Porto Alegre, p. 90. 2013.

SILVEIRA, F. L. **Uso de usinagem por jato de água, CNC e corte a laser no design de superfícies tácteis a partir de padrões modulares encaixáveis em ágata e cedro**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Programa de Pós Graduação em Design e Tecnologia. Porto Alegre. 2011.

SOMMER, C. **Non-traditional machining handbook**. Advanced Publishing Inc, 2009.

TESSMANN, C. S. **Importância do binômio design e engenharia no beneficiamento de rejeito mineral de opala e ágata na produção de camafeus por usinagem CNC**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Faculdade de Arquitetura. Programa de Pós-Graduação em Design. Porto Alegre. 2009.

VIKRAM, G.; BABU, N. R. Modelling and analysis of abrasive water jet cut surface topography. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, vol. 42, p. 1345-1354, ISSN 0890-6955. 2002.

VUNDAVILLI, P. R. et al. Fuzzy logic-based expert system for prediction of depth of cut in abrasive water jet machining process. **Knowledge-Based Systems**, vol. 27, p. 456-464, ISSN 0950-7051. 2012.

WANG, J.; GUO, D. M. A predictive depth of penetration model for abrasive waterjet cutting of polymer matrix composites. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 121, p. 390-394, ISSN 0924-0136. 2002.

WEBB, K. E.; RAJUKAR, K. P. Surface characterization of inconel cut by abrasive water jet. **CSME Mechanical Eng. Forum**, 1990.

WOMA GMBH. **Report Cutting Technique**. 2015.

YUSUP, N. et al. Estimation of optimal machining control parameters using artificial bee colony. **Journal of Intelligent Manufacturing**, vol. 25, p. 1463-1472, ISSN 1572-8145. 2014.

ZENG, J. **Determination of machinability and abrasive cutting properties in AWJ cutting**. 2007 American WJTA Conference and Expo. Houston, Texas. 2007.

ZENG, J.; KIM, T. **Parameter prediction and cost analysis in abrasive waterjet cutting operations**. Proceedings of the 7th American Water Jet Conference. Seattle, Washington. p. 175-189. 1993.

ZENG, J.; KIM, T. J. **Development of an abrasive water jet kerf cutting model for brittle materials**. Jet Cutting Technology. p. 483-501. 1992.

ZENG, J.; KIM, T. J.; WALLACE, R. J. Quantitative evaluation of machinability in abrasive waterjet machining. **PED**, vol. 58, p. 169-179, 1992.

ZHANG, S.; YUQIANG, W.; YANLI, W. An Investigation of Surface Quality Cut by Abrasive Water Jet. **The Open Mechanical Engineering Journal**, vol. 5, p. 166-177, ISSN 1874-155X. 2011.

## APÊNDICE A – Perfis de rugosidade

Tabela A.1 - Amostra 01 – Qualidade  $Q_v$  23,54%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
0-1,5 mm	<p>Perfil 0101</p>	Ra: 6,761 Rz: 36,254

Tabela A.2 - Amostra 02 – Qualidade  $Q_v$  48,86%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
0-1,5 mm	<p>Perfil 0201</p>	Ra: 3,693 Rz: 26,246
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 0202</p>	Ra: 4,533 Rz: 30,296
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 0203</p>	Ra: 7,899 Rz: 44,056

Tabela A.3 - Amostra 03 – Qualidade  $Q_v$  26,68%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm	<p>Perfil 0301</p>	Ra: 3,487 Rz: 20,498
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 0302</p>	Ra: 4,101 Rz: 21,134
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 0303</p>	Ra: 17,055 Rz: 83,638

Tabela A.4 - Amostra 04 – Qualidade  $Q_v$  36,72%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm	<p>Perfil 0403</p>	Ra: 3,001 Rz: 19,352
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 0402</p>	Ra: 5,443 Rz: 32,57
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 0401</p>	Ra: 8,544 Rz: 40,523

Tabela A.5 - Amostra 05 – Qualidade  $Q_v$ , 44,12%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm	<p>Perfil 0503</p>	Ra: 3,483 Rz: 21,777
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 0502</p>	Ra: 4,191 Rz: 24,894
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 0501</p>	Ra: 4,849 Rz: 23,542

Tabela A.6 - Amostra 06 – Qualidade  $Q_v$ , 77,91%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm	<p>Perfil 0603</p>	Ra: 6,983 Rz: 40,871
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 0602</p>	Ra: 5,381 Rz: 37,726
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 0601</p>	Ra: 12,001 Rz: 66,165

Tabela A.7 - Amostra 07 – Qualidade  $Q_v$ , 64,63%.

Prof	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm	<p>Perfil 0703</p>	Ra: 3,233 Rz: 21,680
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 0702</p>	Ra: 5,015 Rz: 29,044
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 0701</p>	Ra: 6,728 Rz: 37,871

Tabela A.8 - Amostra 08 – Qualidade  $Q_v$ , 93,93%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm	<p>Perfil 0801</p>	Ra: 4,681 Rz: 32,914
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 0802</p>	Ra: 3,9 Rz: 25,605
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 0803</p>	Ra: 4,648 Rz: 27,087

Tabela A.9 - Amostra 09 – Qualidade  $Q_v$  41,78%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm	<p>Perfil 0901</p>	Ra: 4,242 Rz: 24,771
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 0902</p>	Ra: 4,407 Rz: 25,653
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 0903</p>	Ra: 6,678 Rz: 45,497

Tabela A.10 - Amostra 10 – Qualidade  $Q_v$  56,98%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm	<p>Perfil 1001</p>	Ra: 3,465 Rz: 21,292
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 1002</p>	Ra: 4,646 Rz: 28,728
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 1003</p>	Ra: 24,674 Rz: 129,287

Tabela A.11 - Amostra 11 – Qualidade  $Q_v$  33,62%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm	<p>Perfil 1101</p>	Ra: 7,526 Rz: 47,067
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 1102</p>	Ra: 5,141 Rz: 29,625
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 1103</p>	Ra: 6,335 Rz: 33,594

Tabela A.12 - Amostra 12 – Qualidade  $Q_v$  100%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm	<p>Perfil 1201</p>	Ra: 3,932 Rz: 22,156
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 1202</p>	Ra: 3,683 Rz: 25,754
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 1203</p>	Ra: 4,682 Rz: 27,023

Tabela A.13 - Amostra 13 – Qualidade  $Q_v$  54,38%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
0-1,5 mm	<p>Perfil 1301</p>	Ra: 4,557 Rz: 27,877
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 1302</p>	Ra: 3,884 Rz: 25,573
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 1303</p>	Ra: 4,682 Rz: 27,023

Tabela A.14 - Amostra 14 – Qualidade  $Q_v$  59,81%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
0-1,5 mm	<p>Perfil 1401</p>	Ra: 4,171 Rz: 26,322
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 1402</p>	Ra: 4,979 Rz: 31,713
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 1403</p>	Ra: 7,238 Rz: 36,047

Tabela A.15 - Amostra 15 – Qualidade  $Q_v$  50,51%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
0-1,5 mm	<p>Perfil 1501</p>	Ra: 4,239 Rz: 29,042
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 1502</p>	Ra: 5,096 Rz: 34,628
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 1503</p>	Ra: 10,989 Rz: 58,136

Tabela A.16 - Amostra 16 – Qualidade  $Q_v$  50,76%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
0-1,5 mm	<p>Perfil 1601</p>	Ra: 5,737 Rz: 34,8
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 1602</p>	Ra: 6,059 Rz: 43,42
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 1603</p>	Ra: 12,049 Rz: 70,057

Tabela A.17 - Amostra 17 – Qualidade  $Q_v$  26,94%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
0-1,5 mm	<p>Perfil 1701</p>	Ra: 8,328 Rz: 30,839
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 1702</p>	Ra: 5,486 Rz: 50,17
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 1703</p>	Ra: 5,056 Rz: 26,889

Tabela A.18 - Amostra 18 – Qualidade  $Q_v$  58,74%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
0-1,5 mm	<p>Perfil 1801</p>	Ra: 8,328 Rz: 50,17
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 1802</p>	Ra: 6,931 Rz: 38,509
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 1803</p>	Ra: 10,054 Rz: 54,286

Tabela A.19 - Amostra 19 - Qualidade  $Q_v$  64,29%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm	<p>Perfil 1901</p>	Ra: 4,546 Rz: 30,354
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 1902</p>	Ra: 4,727 Rz: 25,93
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 1903</p>	Ra: 6,345 Rz: 36,674

Tabela A.20 - Amostra 20 - Qualidade  $Q_v$  56,76%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm	<p>Perfil 2001</p>	Ra: 3,973 Rz: 29,172
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 2002</p>	Ra: 5,141 Rz: 29,172
3,0-4,5 mm		Ra: 9,399 Rz: 45,828

Tabela A.21 - Amostra 21 - Qualidade  $Q_v$  60,43%.

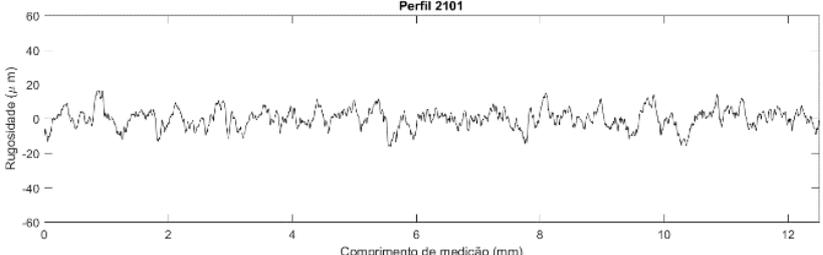
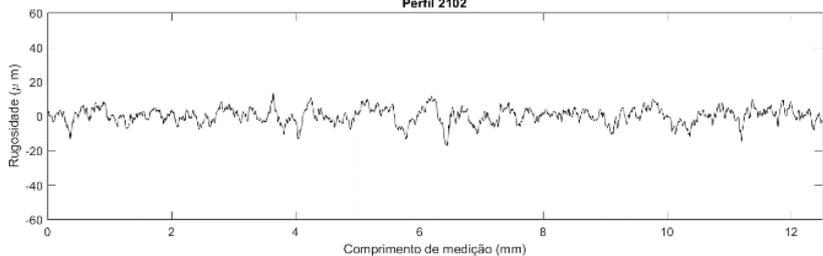
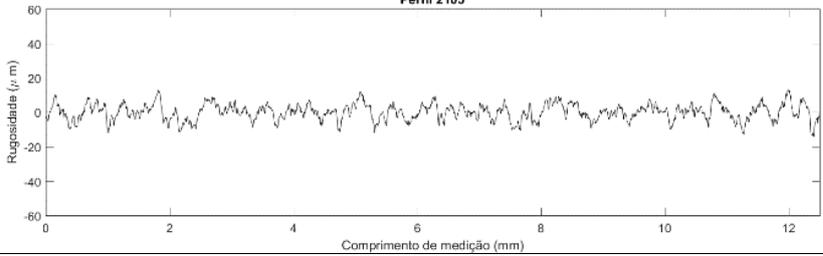
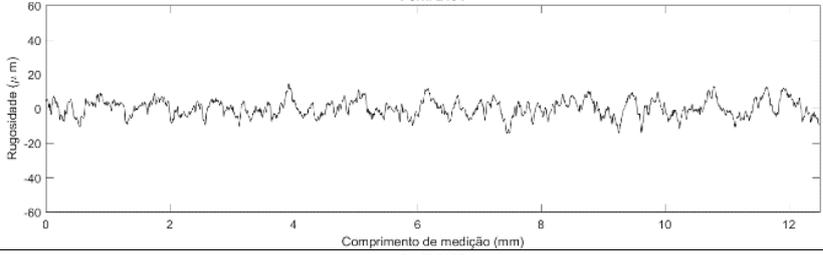
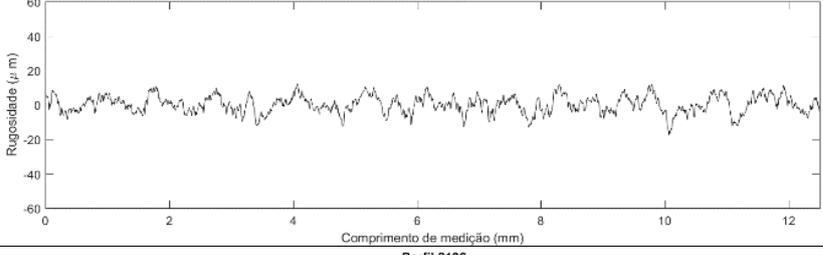
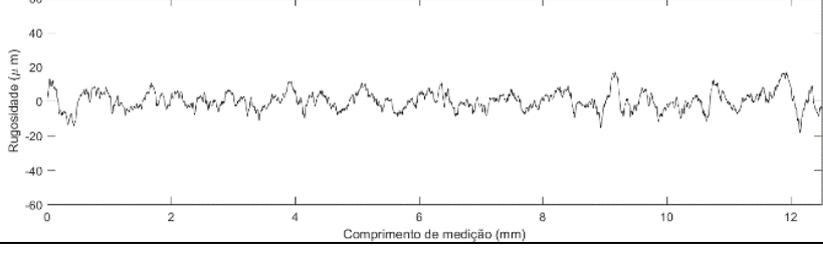
Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm		Ra: 4,350 Rz: 28,114
1,5-3,0 mm		Ra: 3,488 Rz: 24,467
3,0-4,5 mm		Ra: 3,774 Rz: 23,247
4,5-6,0 mm		Ra: 3,974 Rz: 23,966
6,0-7,5 mm		Ra: 4,039 Rz: 24,104
7,5-9,0 mm		Ra: 4,189 Rz: 27,452

Tabela A.21 - Amostra 21 - Qualidade  $Q_v$  60,43%. Continuação.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
9,0-10,5 mm		Ra: 5,085 Rz: 28,764
10,5-12,0 mm		Ra: 6,315 Rz: 34,299
12,0-13,5 mm		Ra: 6,149 Rz: 36,122

Tabela A.22 - Amostra 22 - Qualidade  $Q_v$  41,09%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
0-1,5 mm		Ra: 2,961 Rz: 19,311
1,5-3,0 mm		Ra: 3,124 Rz: 17,602
3,0-4,5 mm		Ra: 3,581 Rz: 22,386

Tabela A.22 - Amostra 22 - Qualidade  $Q_v$  41,09% - Continuação.

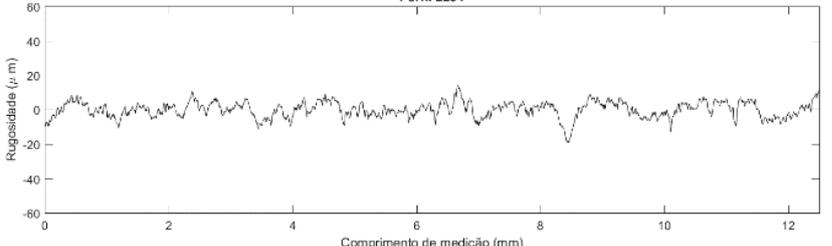
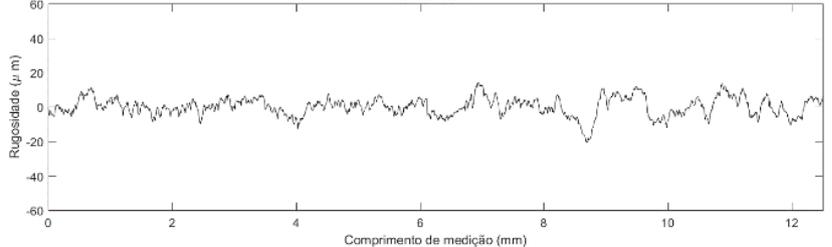
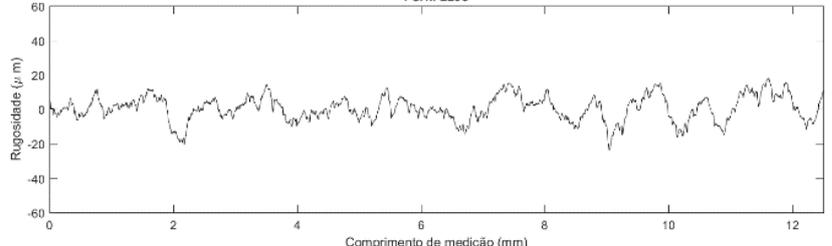
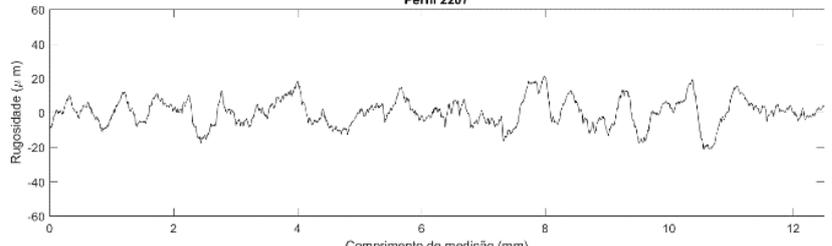
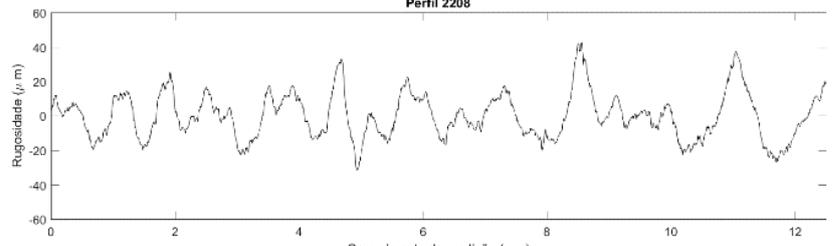
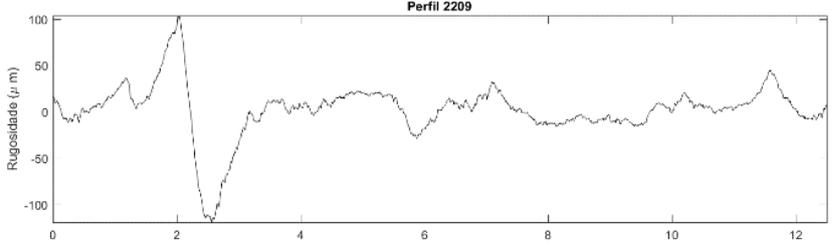
Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
4,5-6,0 mm	<p style="text-align: center;">Perfil 2204</p> 	<p style="text-align: center;">Ra: 3,676 Rz: 23,448</p>
6,0-7,5 mm	<p style="text-align: center;">Perfil 2205</p> 	<p style="text-align: center;">Ra: 4,195 Rz: 24,220</p>
7,5-9,0 mm	<p style="text-align: center;">Perfil 2206</p> 	<p style="text-align: center;">Ra: 5,764 Rz: 32,140</p>
9,0-10,5 mm	<p style="text-align: center;">Perfil 2207</p> 	<p style="text-align: center;">Ra: 6,165 Rz: 37,870</p>
10,5-12,0 mm	<p style="text-align: center;">Perfil 2208</p> 	<p style="text-align: center;">Ra: 10,627 Rz: 56,390</p>
12,0-13,5 mm	<p style="text-align: center;">Perfil 2209</p> 	<p style="text-align: center;">Ra: 17,732 Rz: 100,3</p>

Tabela A.23 - Amostra 23 - Qualidade  $Q_v$  25,39%.

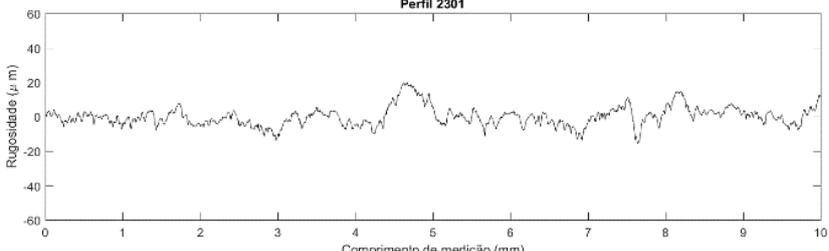
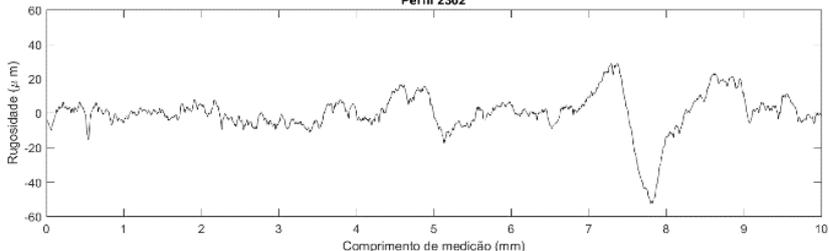
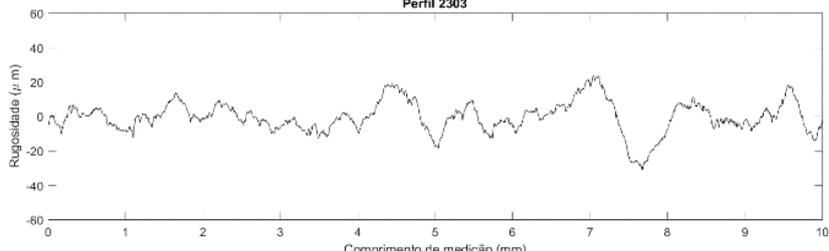
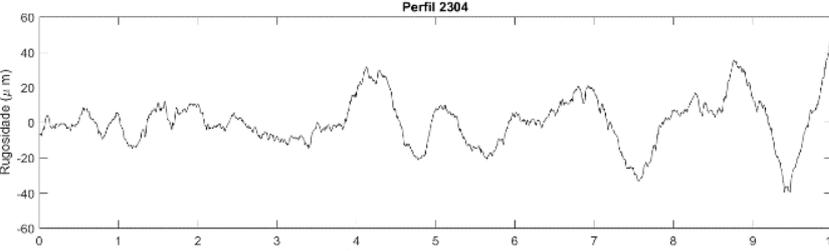
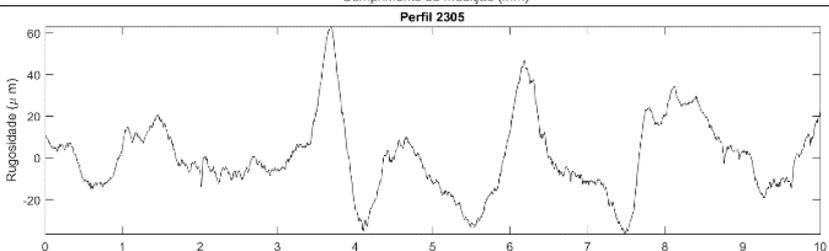
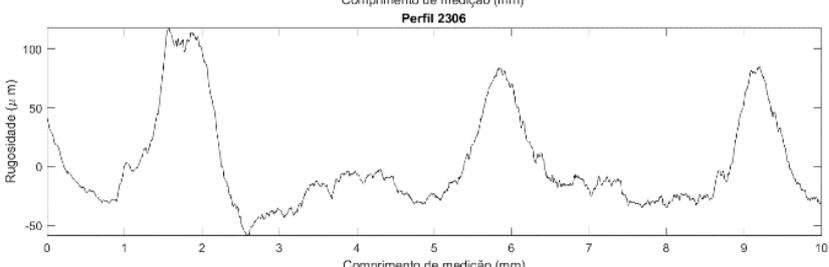
Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm		Ra: 4,141 Rz: 25,720
1,5-3,0 mm		Ra: 7,401 Rz: 43,246
3,0-4,5 mm		Ra: 6,842 Rz: 39,942
4,5-6,0 mm		Ra: 10,450 Rz: 54,662
6,0-7,5 mm		Ra: 13,797 Rz: 71,692
7,5-9,0 mm		Ra: 30,840 Rz: 113,407

Tabela A.24 - Amostra 24 - Qualidade  $Q_v$  29,86%.

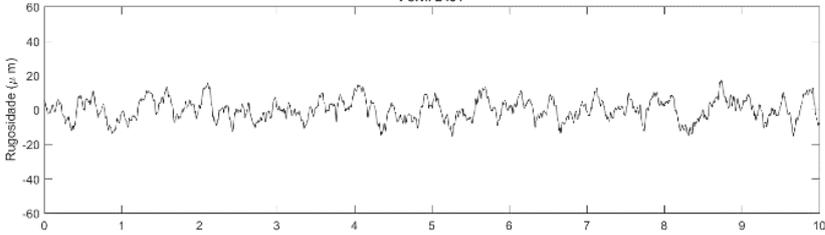
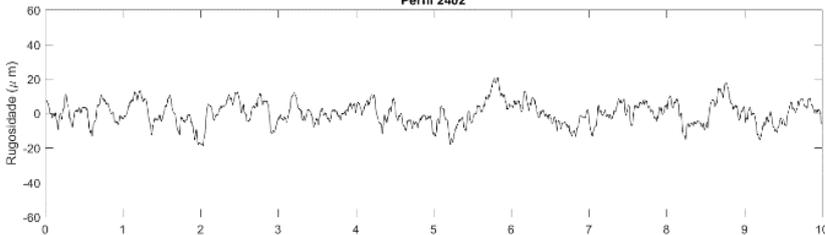
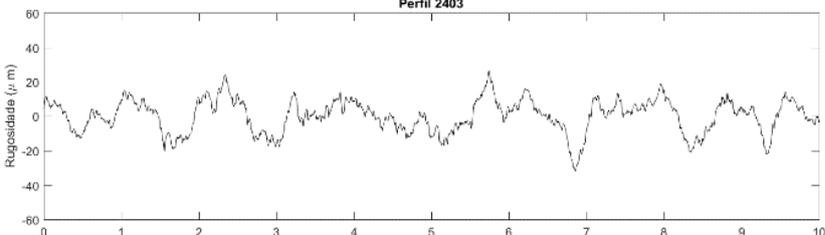
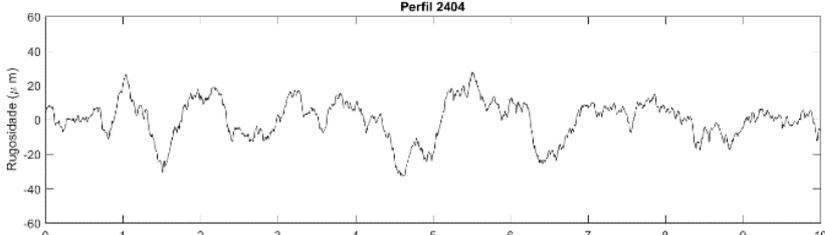
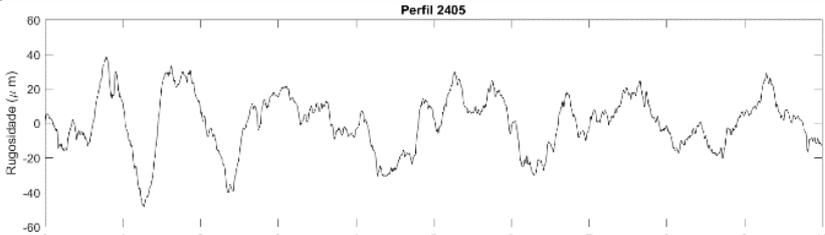
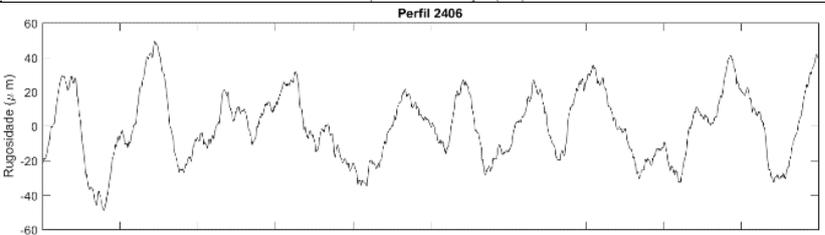
Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm	<p style="text-align: center;"><b>Perfil 2401</b></p> 	<p style="text-align: center;">Ra: 5,018 Rz: 30,091</p>
1,5-3,0 mm	<p style="text-align: center;"><b>Perfil 2402</b></p> 	<p style="text-align: center;">Ra: 5,359 Rz: 32,040</p>
3,0-4,5 mm	<p style="text-align: center;"><b>Perfil 2403</b></p> 	<p style="text-align: center;">Ra: 7,754 Rz: 44,102</p>
4,5-6,0 mm	<p style="text-align: center;"><b>Perfil 2404</b></p> 	<p style="text-align: center;">Ra: 9,007 Rz: 48,276</p>
6,0-7,5 mm	<p style="text-align: center;"><b>Perfil 2405</b></p> 	<p style="text-align: center;">Ra: 13,037 Rz: 62,290</p>
7,5-9,0 mm	<p style="text-align: center;"><b>Perfil 2406</b></p> 	<p style="text-align: center;">Ra: 16,575 Rz: 75,739</p>

Tabela A.24 - Amostra 24 - Qualidade  $Q_v$  29,86%. Continuação.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
9,0-10,5 mm	<p>Perfil 2407</p>	Ra: 28,693 Rz: 138,528
10,5-12,0 mm	<p>Perfil 2409</p>	Ra: 29,525 Rz: 157,247

Tabela A.25 - Amostra 25 - Qualidade  $Q_v$  100%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm	<p>Perfil 2501</p>	Ra: 3,110 Rz: 22,134
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 2502</p>	Ra: 2,702 Rz: 17,834
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 2503</p>	Ra: 2,285 Rz: 15,929
4,5-6,0 mm	<p>Perfil 2504</p>	Ra: 2,499 Rz: 17,297

Tabela A.25 - Amostra 25 - Qualidade  $Q_v$  100%. Continuação.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
6,0-7,5 mm	<p>Perfil 2505</p>	Ra: 2,780 Rz: 17,294
7,5-9,0 mm	<p>Perfil 2506</p>	Ra: 2,804 Rz: 18,190
9,0-10,5 mm	<p>Perfil 2507</p>	Ra: 2,958 Rz: 18,998
10,5-12,0 mm	<p>Perfil 2508</p>	Ra: 3,229 Rz: 21,751

Tabela A.26 - Amostra 26 - Qualidade  $Q_v$  63,19%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm	<p>Perfil 2601</p>	Ra: 3,898 Rz: 25,251
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 2602</p>	Ra: 3,678 Rz: 23,642

Tabela A.26 - Amostra 26 - Qualidade  $Q_v$  63,19%. Continuação.

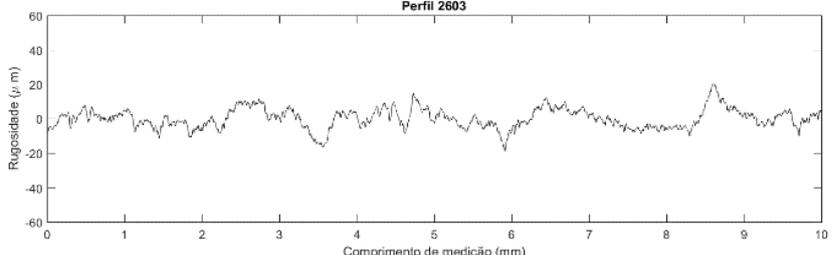
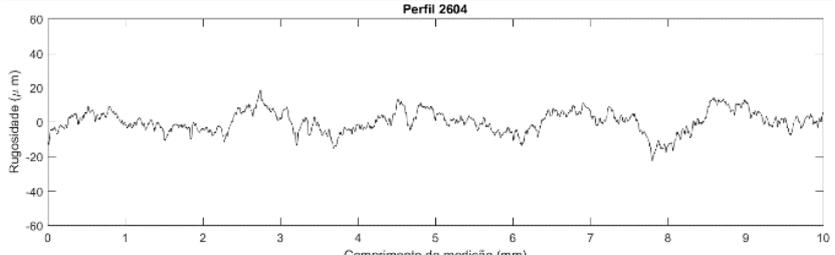
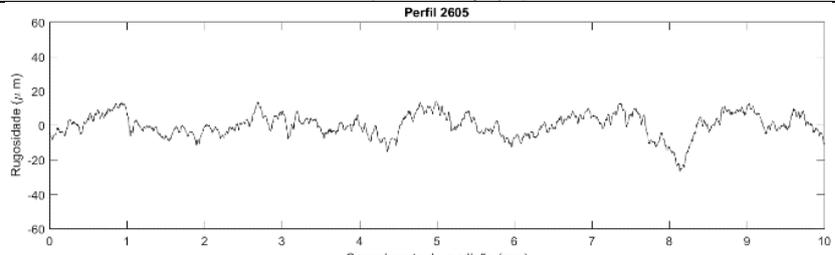
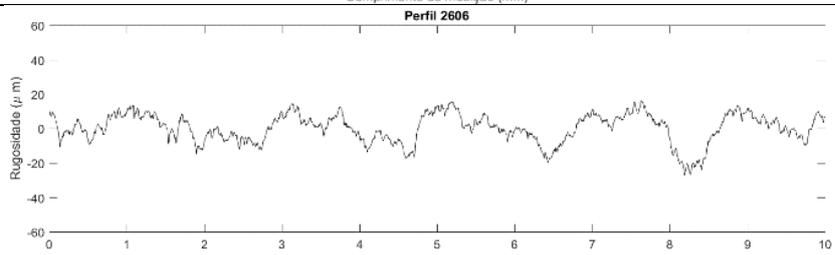
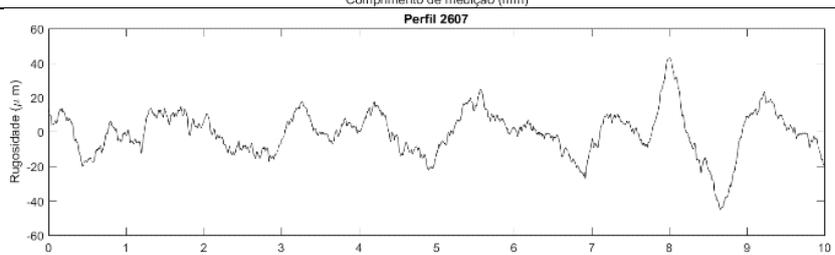
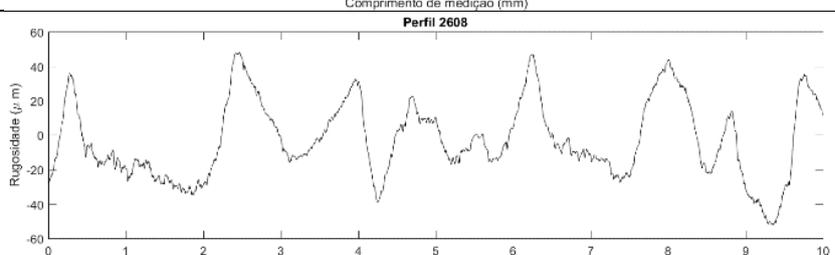
Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
3,0-4,5 mm	 <p>Perfil 2603</p>	Ra: 4,604 Rz: 28,732
4,5-6,0 mm	 <p>Perfil 2604</p>	Ra: 5,045 Rz: 29,523
6,0-7,5 mm	 <p>Perfil 2605</p>	Ra: 5,264 Rz: 29,864
7,5-9,0 mm	 <p>Perfil 2606</p>	Ra: 6,742 Rz: 34,662
9,0-10,5 mm	 <p>Perfil 2607</p>	Ra: 9,897 Rz: 53,811
10,5-12,0 mm	 <p>Perfil 2608</p>	Ra: 18,707 Rz: 84,363

Tabela A.27 - Amostra 27 - Qualidade  $Q_v$  65,13%.

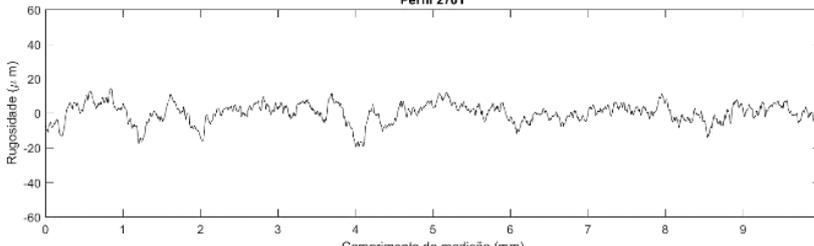
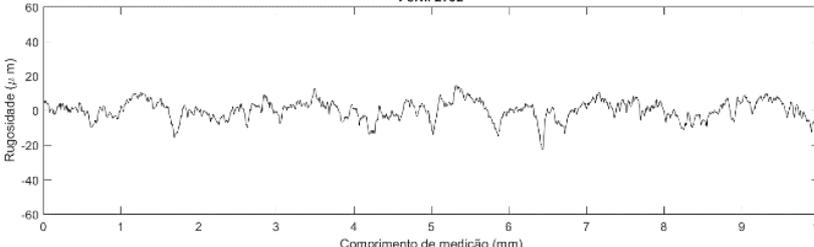
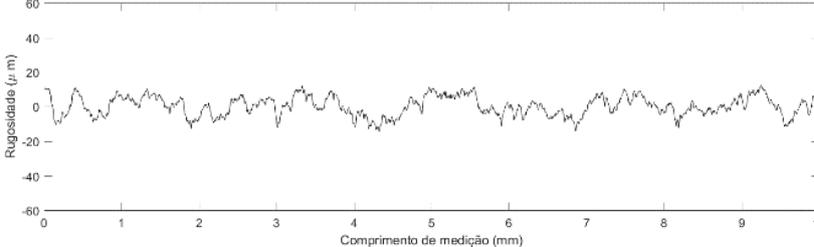
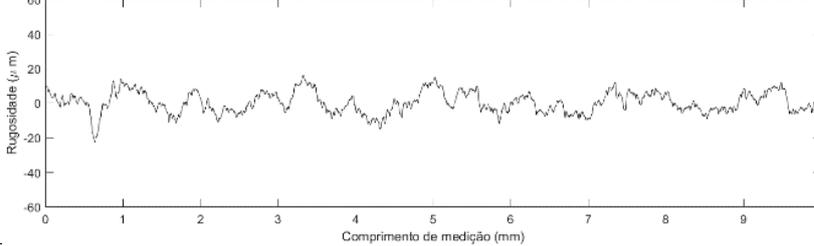
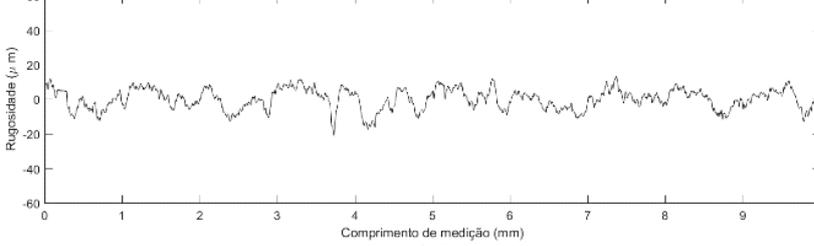
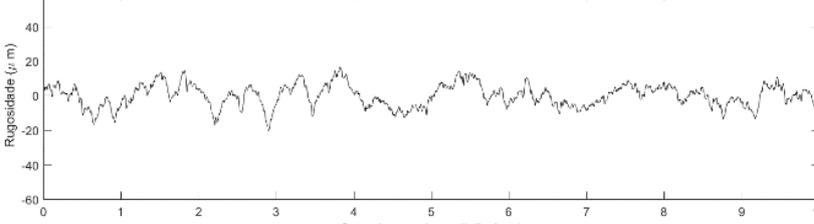
Prof.	Perfil	Ra- Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm		Ra: 4,404 Rz: 28,036
1,5-3,0 mm		Ra: 4,289 Rz: 28,041
3,0-4,5 mm		Ra: 4,738 Rz: 25,036
4,5-6,0 mm		Ra: 5,032 Rz: 29,075
6,0-7,5 mm		Ra: 4,900 Rz: 26,230
7,5-9,0 mm		Ra: 5,334 Rz: 29,533

Tabela A.27 - Amostra 27 - Qualidade  $Q_v$  65,13%. Continuação.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
9,0-10,5 mm	<p>Perfil 2707</p>	Ra: 6,668 Rz: 35,859
10,5-12,0 mm	<p>Perfil 2708</p>	Ra: 6,851 Rz: 40,617

Tabela A.28 - Amostra 28 - Qualidade  $Q_v$  60,40%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
0-1,5 mm	<p>Perfil 2801</p>	Ra: 5,766 Rz: 36,635
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 2802</p>	Ra: 5,401 Rz: 33,432
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 2803</p>	Ra: 5,886 Rz: 32,745
4,5-6,0 mm	<p>Perfil 2804</p>	Ra: 6,218 Rz: 34,719

Tabela A.28 - Amostra 28 - Qualidade  $Q_v$  60,40%. Continuação.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
6,0-7,5 mm		Ra: 7,236 Rz: 42,443
7,5-9,0 mm		Ra: 9,487 Rz: 54,106
9,0-10,5 mm		Ra: 14,425 Rz: 80,122
10,5-12,0 mm		Ra: 23,727 Rz: 132,400

Tabela A.29 - Amostra 29 - Qualidade  $Q_v$  24,35%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm		Ra: 2,595 Rz: 16,834
1,5-3,0 mm		Ra: 2,862 Rz: 18,805

Tabela A.29 - Amostra 29 - Qualidade  $Q_v$  24,35%. Continuação.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 2903</p>	Ra: 3,993 Rz: 21,988
4,5-6,0 mm	<p>Perfil 2904</p>	Ra: 7,351 Rz: 43,662
6,0-7,5 mm	<p>Perfil 2905</p>	Ra: 10,270 Rz: 50,774

Tabela A.30 - Amostra 30 - Qualidade  $Q_v$  29,59%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
0-1,5 mm	<p>Perfil 3001</p>	Ra: 4,435 Rz: 26,875
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 3002</p>	Ra: 4,241 Rz: 26,228
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 3003</p>	Ra: 5,470 Rz: 30,303

Tabela A.30 - Amostra 30 - Qualidade  $Q_v$  29,59%. Continuação.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
4,5-6,0 mm	<p>Perfil 3004</p>	Ra: 6,321 Rz: 32,362
6,0-7,5 mm	<p>Perfil 3005</p>	Ra: 7,214 Rz: 35,558
7,5-9,0 mm	<p>Perfil 3006</p>	Ra: 8,513 Rz: 38,085
9,0-10,5 mm	<p>Perfil 3007</p>	Ra: 8,068 Rz: 38,498
10,5-12,0 mm	<p>Perfil 3008</p>	Ra: 13,559 Rz: 64,370

Tabela A.31 - Amostra 31 - Qualidade  $Q_v$  26,35%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
0-1,5 mm	<p>Perfil 3101</p>	Ra: 3,652 Rz: 20,238

Tabela A.31 - Amostra 31 - Qualidade  $Q_v$  26,35%.

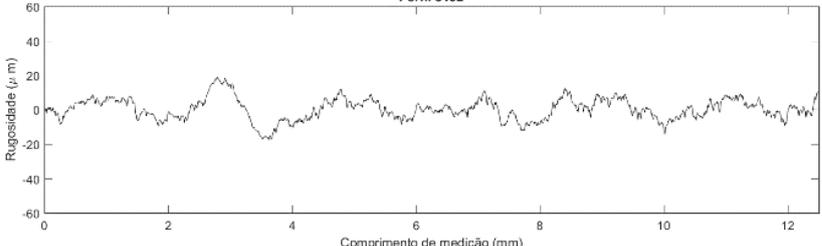
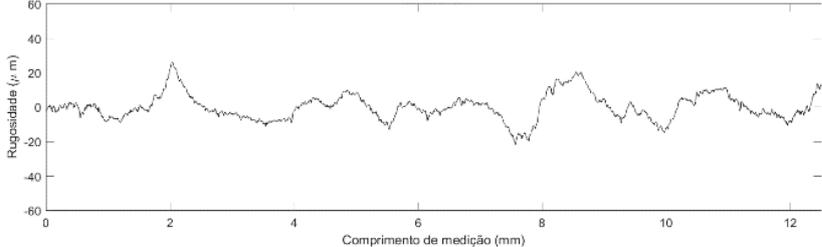
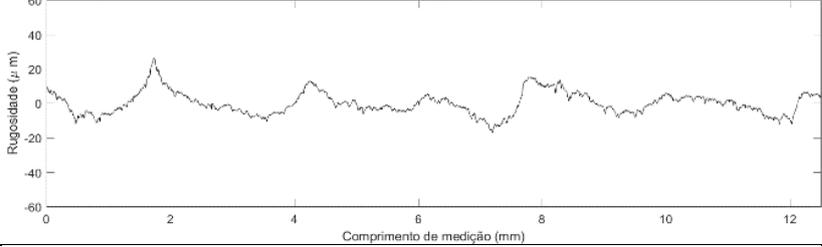
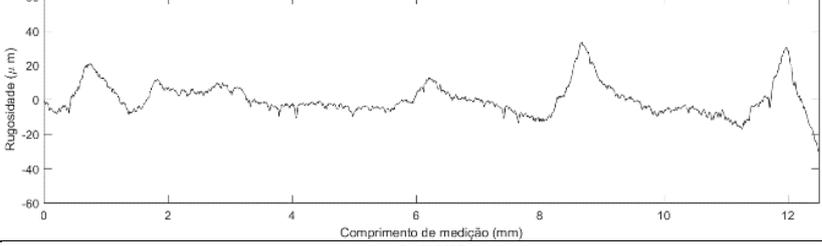
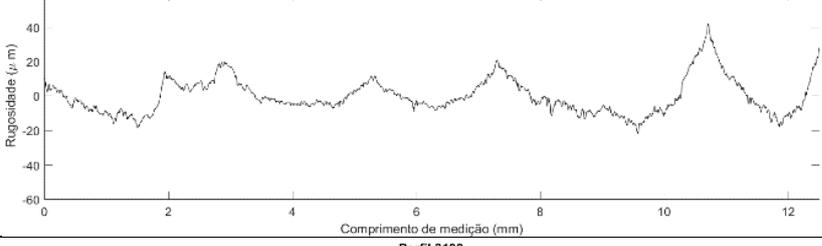
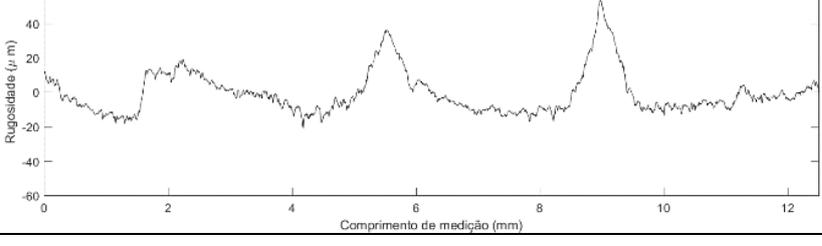
Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
1,5-3,0 mm	<p style="text-align: center;">Perfil 3102</p> 	Ra: 4,989 Rz: 24,925
3,0-4,5 mm	<p style="text-align: center;">Perfil 3104</p> 	Ra: 5,840 Rz: 29,944
4,5-6,0 mm	<p style="text-align: center;">Perfil 3105</p> 	Ra: 5,230 Rz: 25,444
6,0-7,5 mm	<p style="text-align: center;">Perfil 3106</p> 	Ra: 6,890 Rz: 36,393
7,5-9,0 mm	<p style="text-align: center;">Perfil 3107</p> 	Ra: 8,140 Rz: 36,741
9,0-10,5 mm	<p style="text-align: center;">Perfil 3108</p> 	Ra: 9,497 Rz: 42,446

Tabela A.32 - Amostra 32 - Qualidade  $Q_v$  26,50%.

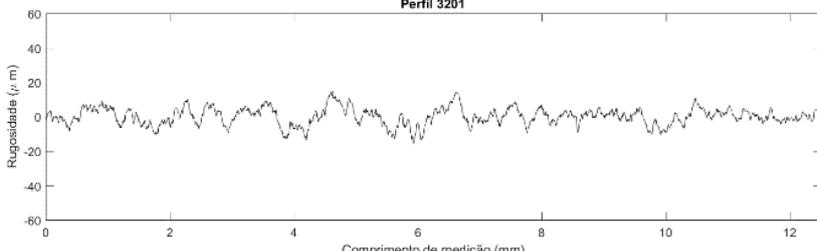
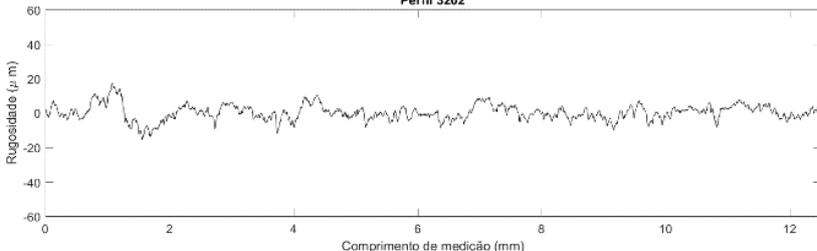
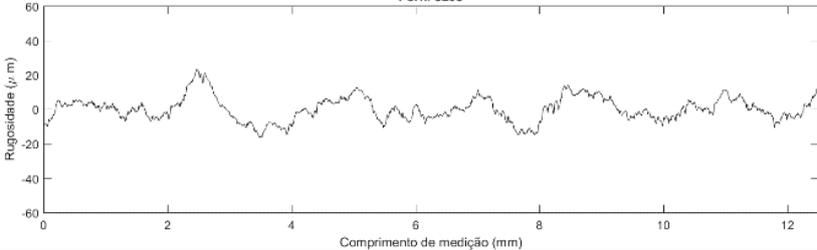
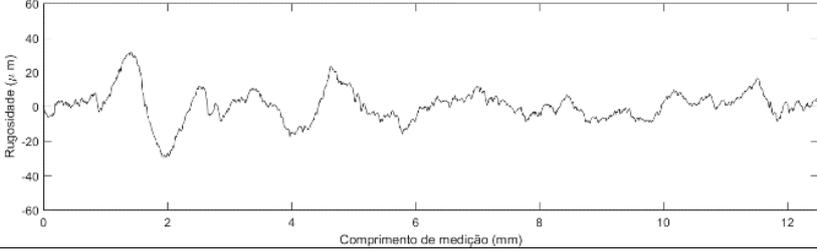
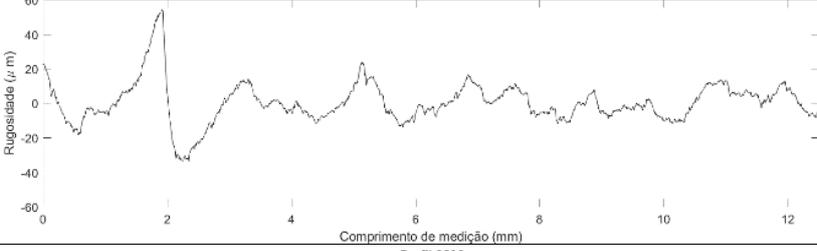
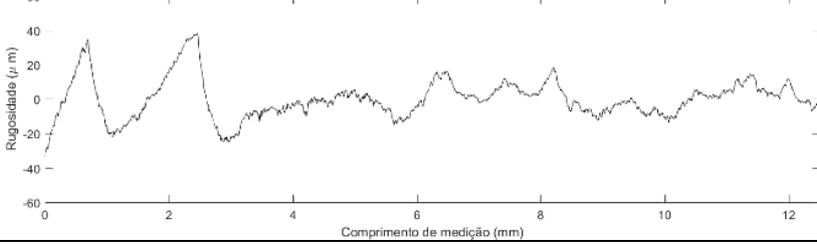
Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm		Ra: 3,938 Rz: 23,667
1,5-3,0 mm		Ra: 3,439 Rz: 21,627
3,0-4,5 mm		Ra: 5,482 Rz: 29,262
4,5-6,0 mm		Ra: 6,712 Rz: 34,354
6,0-7,5 mm		Ra: 8,343 Rz: 42,356
7,5-9,0 mm		Ra: 8,271 Rz: 41,976

Tabela A.32 - Amostra 32 - Qualidade  $Q_v$  26,50%. Continuação.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
9,0-10,5 mm	<p>Perfil 3207</p>	Ra: 14,226 Rz: 70,297
10,5-12,0 mm	<p>Perfil 3208</p>	Ra: 18,309 Rz: 84,192

Tabela A.33 - Amostra 33 - Qualidade  $Q_v$  31,04%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
0-1,5 mm	<p>Perfil 3301</p>	Ra: 4,131 Rz: 24,252
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 3302</p>	Ra: 4,980 Rz: 27,353
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 3303</p>	Ra: 6,352 Rz: 32,840
4,5-6,0 mm	<p>Perfil 3304</p>	Ra: 6,312 Rz: 33,483

Tabela A.33 - Amostra 33 - Qualidade  $Q_v$  31,04%. Continuação.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
6,0-7,5 mm	<p>Perfil 3305</p>	Ra: 7,170 Rz: 38,932
7,5-9,0 mm	<p>Perfil 3306</p>	Ra: 8,249 Rz: 40,081
9,0-10,5 mm	<p>Perfil 3307</p>	Ra: 11,494 Rz: 57,343
10,5-12,0 mm	<p>Perfil 3308</p>	Ra: 10,229 Rz: 58,698
12,0-13,5 mm	<p>Perfil 3309</p>	Ra: 14,351 Rz: 73,248

Tabela A.34 - Amostra 34 - Qualidade  $Q_v$  44,07%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm	<p>Perfil 3401</p>	Ra: 4,576 Rz: 26,335

Tabela A.34 - Amostra 34 - Qualidade  $Q_v$  44,07%. Continuação.

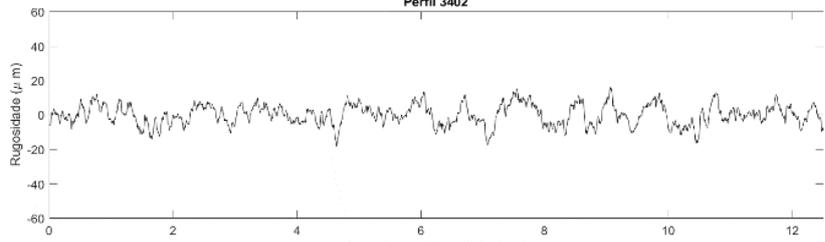
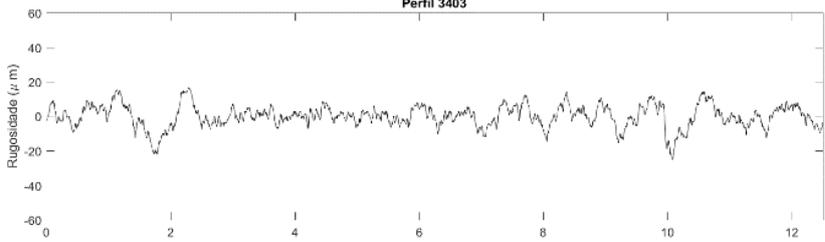
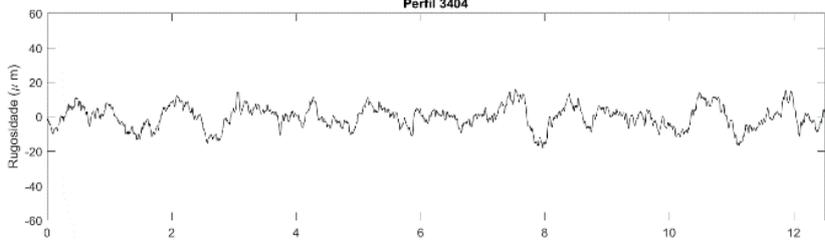
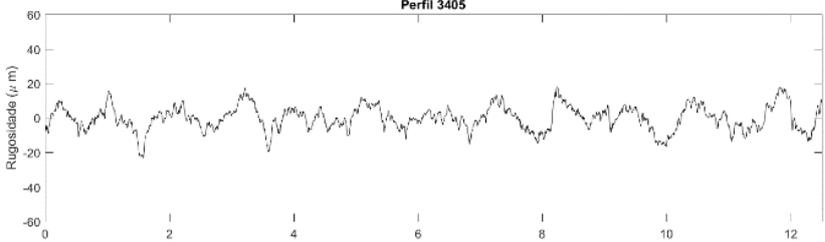
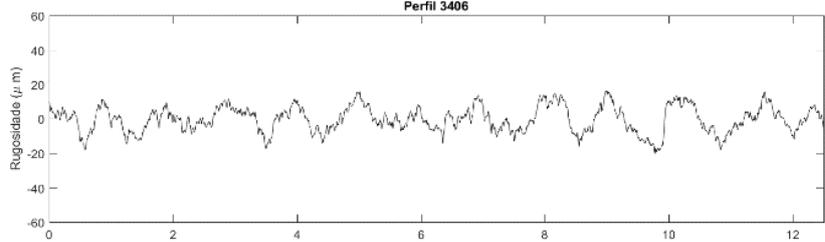
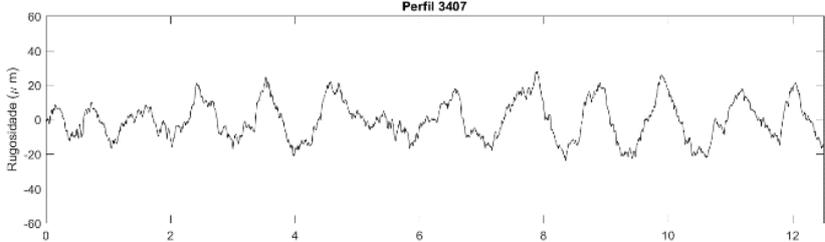
Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
1,5-3,0 mm		Ra: 4,844 Rz: 28,843
3,0-4,5 mm		Ra: 4,947 Rz: 29,834
4,5-6,0 mm		Ra: 5,186 Rz: 29,621
6,0-7,5 mm		Ra: 5,495 Rz: 34,594
7,5-9,0 mm		Ra: 6,107 Rz: 32,624
9,0-10,5 mm		Ra: 9,266 Rz: 43,067

Tabela A.34 - Amostra 34 - Qualidade  $Q_v$  44,07%. Continuação.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
10,5- 12,0 mm	<p>Perfil 3408</p>	Ra: 12,309 Rz: 56,151
12,0- 13,5 mm	<p>Perfil 3409</p>	

Tabela A.35 - Amostra 35 - Qualidade  $Q_v$  19,52%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm	<p>Perfil 3501</p>	Ra: 2,635 Rz: 17,622
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 3502</p>	Ra: 3,221 Rz: 18,363
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 3503</p>	Ra: 3,709 Rz: 20,065
4,5-6,0 mm	<p>Perfil 3504</p>	Ra: 5,859 Rz: 30,617

Tabela A.35 - Amostra 35 - Qualidade  $Q_v$  19,52%. Continuação.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
6,0-7,5 mm	<p>Perfil 3505</p>	Ra: 6,381 Rz: 34,002
7,5-9,0 mm	<p>Perfil 3506</p>	Ra: 4,989 Rz: 25,975
9,0-10,5 mm	<p>Perfil 3507</p>	Ra: 20,065 Rz: 103,739

Tabela A.36 - Amostra 36 - Qualidade  $Q_v$  30,18%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm	<p>Perfil 3601</p>	Ra: 4,438 Rz: 29,527
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 3602</p>	Ra: 4,276 Rz: 27,894
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 3603</p>	Ra: 4,698 Rz: 25,455

Tabela A.36 - Amostra 36 - Qualidade  $Q_v$  30,18%. Continuação.

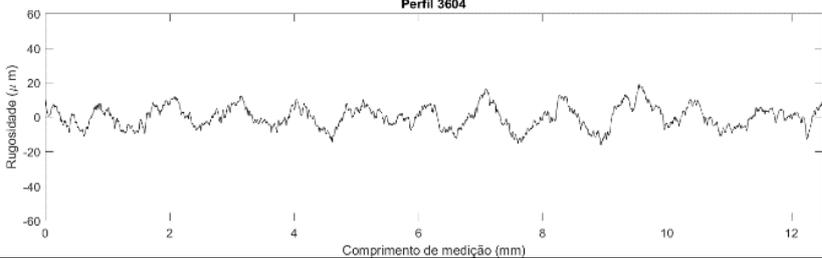
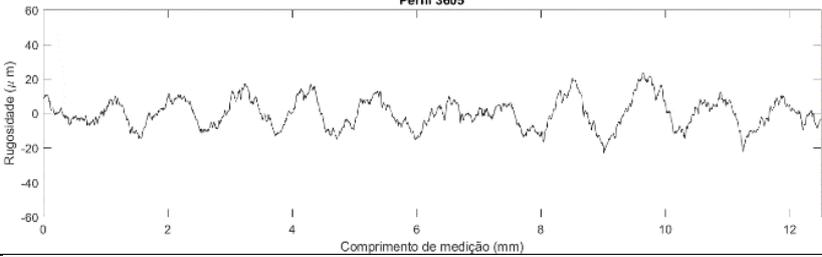
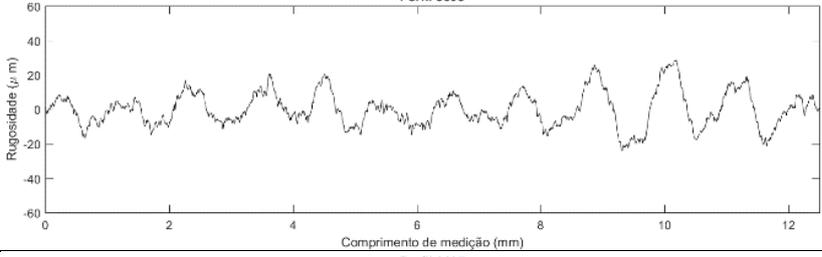
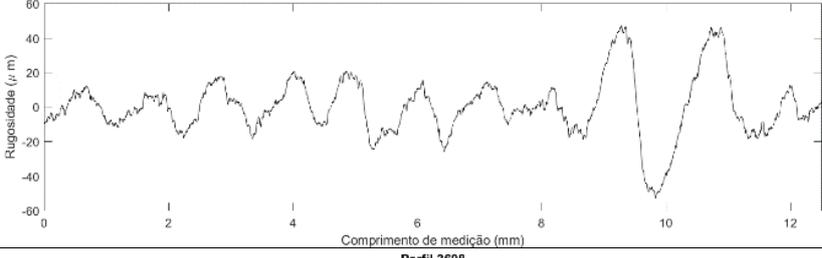
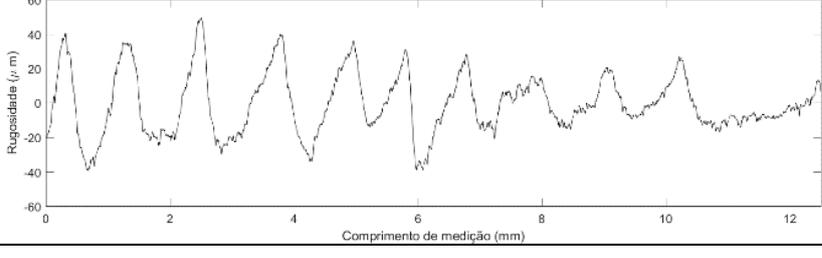
Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
4,5-6,0 mm	<p>Perfil 3604</p>  <p>Rugosidade (<math>\mu\text{m}</math>)</p> <p>Comprimento de medição (mm)</p>	<p>Ra: 5,251 Rz: 27,498</p>
6,0-7,5 mm	<p>Perfil 3605</p>  <p>Rugosidade (<math>\mu\text{m}</math>)</p> <p>Comprimento de medição (mm)</p>	<p>Ra: 6,947 Rz: 33,582</p>
7,5-9,0 mm	<p>Perfil 3606</p>  <p>Rugosidade (<math>\mu\text{m}</math>)</p> <p>Comprimento de medição (mm)</p>	<p>Ra: 8,086 Rz: 38,709</p>
9,0-10,5 mm	<p>Perfil 3607</p>  <p>Rugosidade (<math>\mu\text{m}</math>)</p> <p>Comprimento de medição (mm)</p>	<p>Ra: 12,177 Rz: 59,985</p>
10,5-12,0 mm	<p>Perfil 3608</p>  <p>Rugosidade (<math>\mu\text{m}</math>)</p> <p>Comprimento de medição (mm)</p>	<p>Ra: 14,150 Rz: 64,265</p>

Tabela A.37 - Amostra 37 - Qualidade  $Q_v$  11,47%.

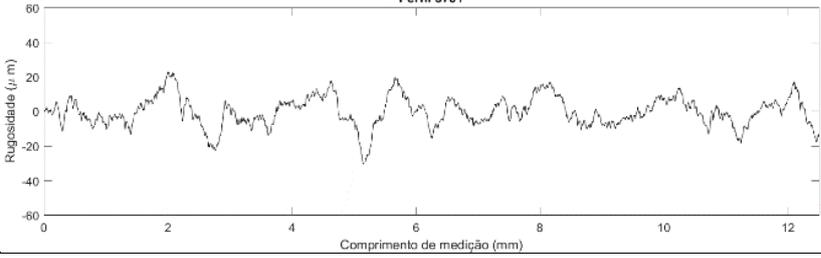
Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm	<p>Perfil 3701</p>  <p>Rugosidade (<math>\mu\text{m}</math>)</p> <p>Comprimento de medição (mm)</p>	<p>Ra: 6,725 Rz: 38,079</p>

Tabela A.37 - Amostra 37 - Qualidade  $Q_v$  11,47%. Continuação.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 3702</p>	Ra: 8,728 Rz: 40,197
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 3703</p>	Ra: 14,079 Rz: 56,480
4,5-6,0 mm	<p>Perfil 3704</p>	Ra: 21,994 Rz: 98,029

Tabela A.38 - Amostra 38 - Qualidade  $Q_v$  51,74%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
0-1,5 mm	<p>Perfil 3801</p>	Ra: 5,461 Rz: 32,553
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 3802</p>	Ra: 6,841 Rz: 36,520
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 3803</p>	Ra: 9,844 Rz: 51,977

Tabela A.38 - Amostra 38 - Qualidade  $Q_v$  51,74%. Continuação.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
4,5-6,0 mm		Ra: 11,320 Rz: 63,970
6,0-7,5 mm		Ra: 16,161 Rz: 75,389

Tabela A.39 - Amostra 39 - Qualidade  $Q_v$  25,17%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
0-1,5 mm		Ra: 5,101 Rz: 29,785
1,5-3,0 mm		Ra: 5,053 Rz: 29,372
3,0-4,5 mm		Ra: 13,374 Rz: 76,287
4,5-6,0 mm		Ra: 10,450 Rz: 48,458

Tabela A.39 - Amostra 39 - Qualidade  $Q_v$  25,17%. Continuação.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
6,0-7,5 mm		Ra: 18,604 Rz: 76,952
7,5-9,0 mm		Ra: 31,552 Rz: 162,135

Tabela A.40 - Amostra 40 - Qualidade  $Q_v$  31,65%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
0-1,5 mm		Ra: 2,766 Rz: 18,127
1,5-3,0 mm		Ra: 3,181 Rz: 19,101
3,0-4,5 mm		Ra: 3,690 Rz: 22,742
4,5-6,0 mm		Ra: 5,552 Rz: 26,422

Tabela A.40 - Amostra 40 - Qualidade  $Q_v$  31,65%. Continuação.

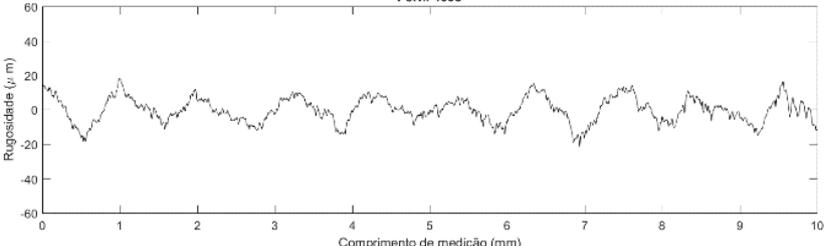
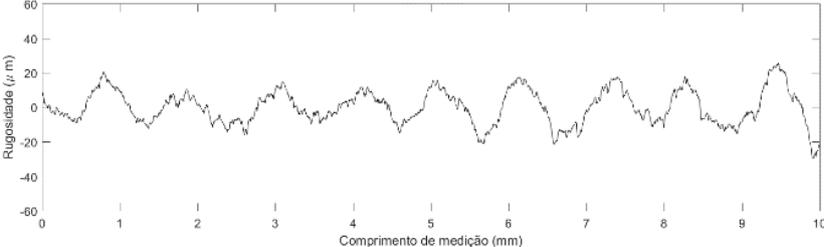
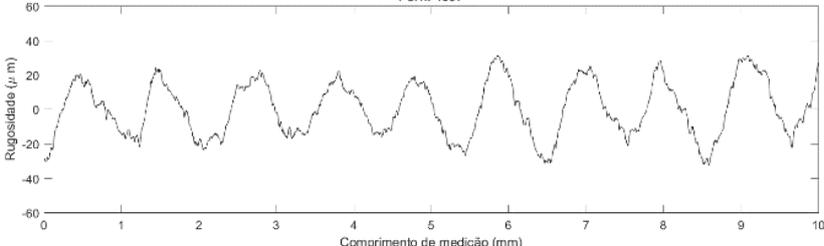
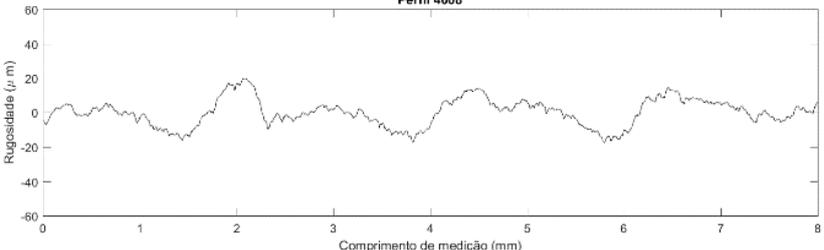
Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
6,0-7,5 mm	<p style="text-align: center;"><b>Perfil 4005</b></p>  <p style="text-align: center;">Rugosidade (<math>\mu\text{m}</math>)</p> <p style="text-align: center;">Comprimento de medição (mm)</p>	<p style="text-align: center;">Ra: 5,845 Rz: 32,540</p>
7,5-9,0 mm	<p style="text-align: center;"><b>Perfil 4006</b></p>  <p style="text-align: center;">Rugosidade (<math>\mu\text{m}</math>)</p> <p style="text-align: center;">Comprimento de medição (mm)</p>	<p style="text-align: center;">Ra: 8,151 Rz: 40,028</p>
9,0-10,5 mm	<p style="text-align: center;"><b>Perfil 4007</b></p>  <p style="text-align: center;">Rugosidade (<math>\mu\text{m}</math>)</p> <p style="text-align: center;">Comprimento de medição (mm)</p>	<p style="text-align: center;">Ra: 13,513 Rz: 55,305</p>
10,5-12,0 mm	<p style="text-align: center;"><b>Perfil 4008</b></p>  <p style="text-align: center;">Rugosidade (<math>\mu\text{m}</math>)</p> <p style="text-align: center;">Comprimento de medição (mm)</p>	<p style="text-align: center;">Ra: 6,138 Rz: 26,369</p>

Tabela A.41 - Amostra 41 – Qualidade  $Q_v$  93,36%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm	<p>Perfil 4101</p>	Ra: 5,679 Rz: 32,929
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 4102</p>	Ra: 4,186 Rz: 26,772
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 4103</p>	Ra: 4,675 Rz: 32,112

Tabela A.42 - Amostra 42 – Qualidade  $Q_v$  100%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm	<p>Perfil 4201</p>	Ra: 6,814 Rz: 41,134
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 4202</p>	Ra: 4,196 Rz: 27,49
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 4203</p>	Ra: 4,840 Rz: 28,912

Tabela A.43 - Amostra 43 – Qualidade  $Q_v$  74,92%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
0-1,5 mm	<p>Perfil 4301</p>	Ra: 5,964 Rz: 33,655
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 4302</p>	Ra: 4,980 Rz: 30,184
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 4303</p>	Ra: 6,959 Rz: 41,862

Tabela A.44 - Amostra 44 – Qualidade  $Q_v$  64,64%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
0-1,5 mm	<p>Perfil 4401</p>	Ra: 5,753 Rz: 39,099
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 4402</p>	Ra: 5,362 Rz: 33,917
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 4403</p>	Ra: 7,391 Rz: 40,933

Tabela A.45 - Amostra 45 – Qualidade  $Q_v$  50,76%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
0-1,5 mm	<p>Perfil 4501</p>	Ra: 4,739 Rz: 31,394
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 4502</p>	Ra: 4,685 Rz: 30,579
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 4503</p>	Ra: 10,923 Rz: 61,463

Tabela A.46 - Amostra 46 – Qualidade  $Q_v$  81,46%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
0-1,5 mm	<p>Perfil 4601</p>	Ra: 5,124 Rz: 30,196
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 4602</p>	Ra: 0,136 Rz: 2,548
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 4603</p>	Ra: 7,446 Rz: 39,513

Tabela A.47 - Amostra 47 – Qualidade  $Q_v$  77,56%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
0-1,5 mm	<p>Perfil 4701</p>	Ra: 5,501 Rz: 34,915
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 4702</p>	Ra: 4,641 Rz: 33,067
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 4703</p>	Ra: 7,696 Rz: 37,072

Tabela A.48 - Amostra 48 – Qualidade  $Q_v$  75,70%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
0-1,5 mm	<p>Perfil 4803</p>	Ra: 7,567 Rz: 41,932
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 4802</p>	Ra: 4,335 Rz: 26,359
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 4801</p>	Ra: 9,667 Rz: 50,275

Tabela A.49 - Amostra 49 – Qualidade  $Q_v$  55,41%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm	<p>Perfil 4901</p>	Ra: 6,651 Rz: 36,101
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 4902</p>	Ra: 4,510 Rz: 25,667
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 4903</p>	Ra: 9,715 Rz: 51,196

Tabela A.50 - Amostra 51 – Qualidade  $Q_v$  100%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm	<p>Perfil 5101</p>	Ra: 5,315 Rz: 34,224
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 5102</p>	Ra: 5,153 Rz: 34,576
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 5103</p>	Ra: 5,822 Rz: 34,293

Tabela A.51 - Amostra 52 – Qualidade  $Q_v$  91,32%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm	<p>Perfil 5201</p>	<p>Ra: 4,884 Rz: 30,562</p>
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 5202</p>	<p>Ra: 3,755 Rz: 22,033</p>
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 5203</p>	<p>Ra: 5,362 Rz: 31,567</p>

Tabela A.52 - Amostra 53 – Qualidade  $Q_v$  100%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm	<p>Perfil 5301</p>	<p>Ra: 3,154 Rz: 19,142</p>
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 5302</p>	<p>Ra: 2,353 Rz: 12,627</p>
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 5303</p>	<p>Ra: 2,715 Rz: 14,637</p>

Tabela A.53 - Amostra 54 – Qualidade  $Q_v$  84,76%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm	<p>Perfil 5403</p>	Ra: 5,324 Rz: 31,384
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 5402</p>	Ra: 5,174 Rz: 32,328
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 5401</p>	Ra: 11,478 Rz: 65,780

Tabela A.54 - Amostra 55 – Qualidade  $Q_v$  62,86%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm	<p>Perfil 5501</p>	Ra: 4,298 Rz: 26,357
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 5502</p>	Ra: 4,603 Rz: 27,595
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 5503</p>	Ra: 6,629 Rz: 39,704

Tabela A.55 - Amostra 56 – Qualidade  $Q_v$  50,10%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
0-1,5 mm	<p>Perfil 5601</p>	Ra: 4,210 Rz: 24,715
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 5602</p>	Ra: 4,611 Rz: 29,566
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 5603</p>	Ra: 8,210 Rz: 47,505

Tabela A.56 - Amostra 57 – Qualidade  $Q_v$  21,56%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
0-1,5 mm	<p>Perfil 5701</p>	Ra: 6,036 Rz: 39,835
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 5702</p>	Ra: 5,790 Rz: 30,207
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 5703</p>	Ra: 18,314 Rz: 90,713

Tabela A.57 - Amostra 58 – Qualidade  $Q_v$  41,22%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm	<p>Perfil 5801</p>	Ra: 5,793 Rz: 34,316
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 5802</p>	Ra: 4,283 Rz: 28,947
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 5803</p>	Ra: 7,240 Rz: 39,855

Tabela A.58 - Amostra 59 – Qualidade  $Q_v$  47,41%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm	<p>Perfil 5901</p>	Ra: 2,803 Rz: 19,282
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 5902</p>	Ra: 2,872 Rz: 19,851
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 5903</p>	Ra: 5,772 Rz: 31,128

Tabela A.59 - Amostra 59 – Qualidade  $Q_v$  47,41%. Continuação.

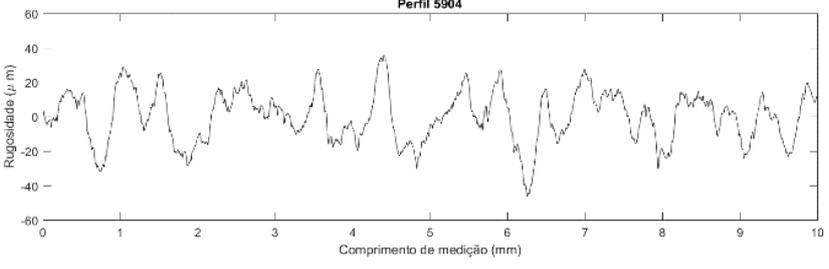
Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
4,5-6,0 mm	 <p>Perfil 5904</p> <p>Rugosidade (<math>\mu\text{m}</math>)</p> <p>Comprimento de medição (mm)</p>	<p>Ra: 12,114 Rz: 62,741</p>

Tabela A.59 - Amostra 60 – Qualidade  $Q_v$  75,93%.

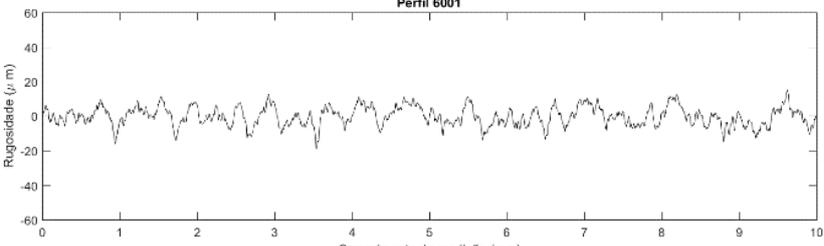
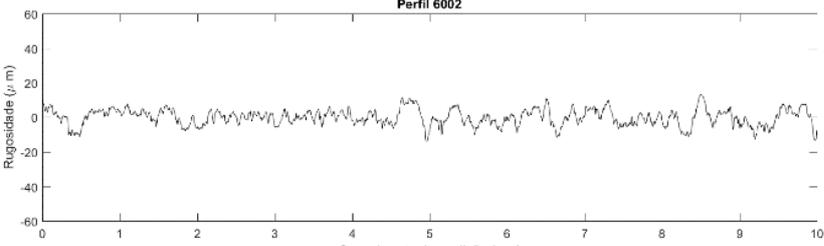
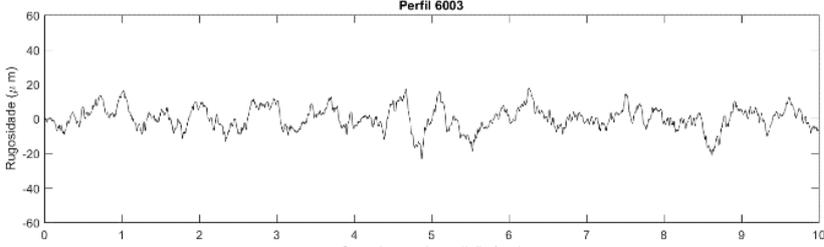
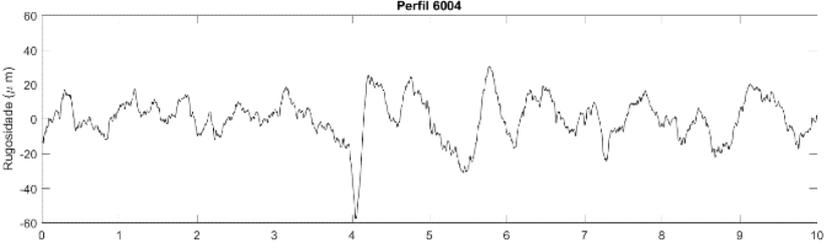
Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm	 <p>Perfil 6001</p> <p>Rugosidade (<math>\mu\text{m}</math>)</p> <p>Comprimento de medição (mm)</p>	<p>Ra: 4,494 Rz: 28,572</p>
1,5-3,0 mm	 <p>Perfil 6002</p> <p>Rugosidade (<math>\mu\text{m}</math>)</p> <p>Comprimento de medição (mm)</p>	<p>Ra: 3,779 Rz: 24,166</p>
3,0-4,5 mm	 <p>Perfil 6003</p> <p>Rugosidade (<math>\mu\text{m}</math>)</p> <p>Comprimento de medição (mm)</p>	<p>Ra: 5,151 Rz: 35,533</p>
4,5-6,0 mm	 <p>Perfil 6004</p> <p>Rugosidade (<math>\mu\text{m}</math>)</p> <p>Comprimento de medição (mm)</p>	<p>Ra: 9,234 Rz: 54,680</p>

Tabela A.60 - Amostra 61 – Qualidade  $Q_v$  83,54%.

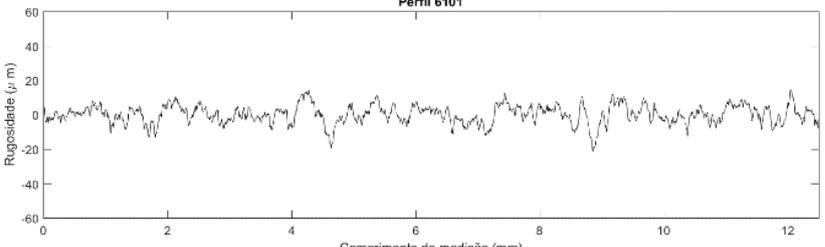
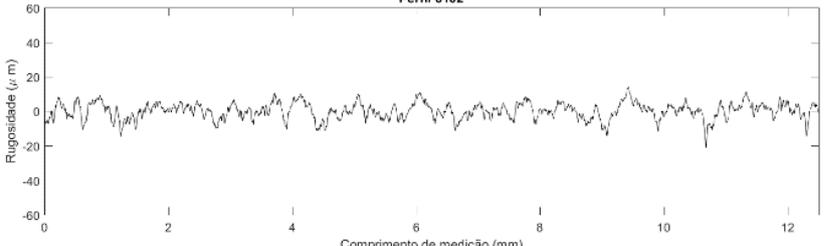
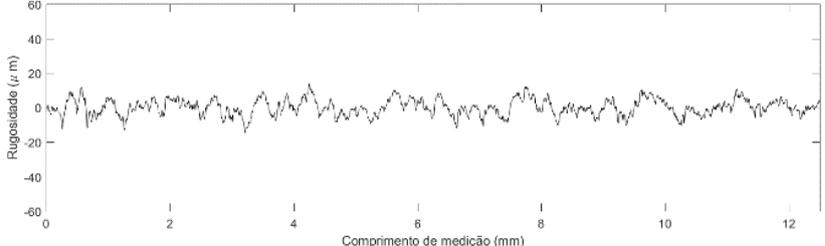
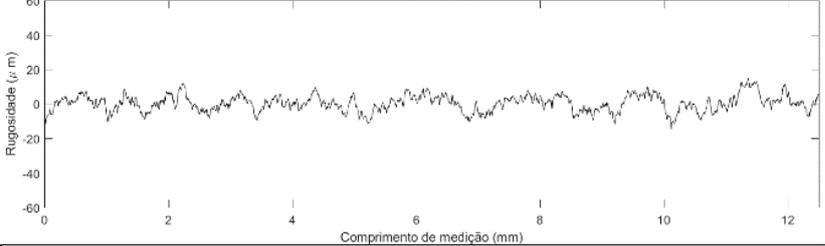
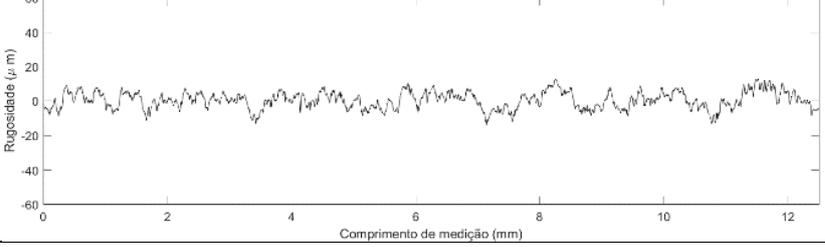
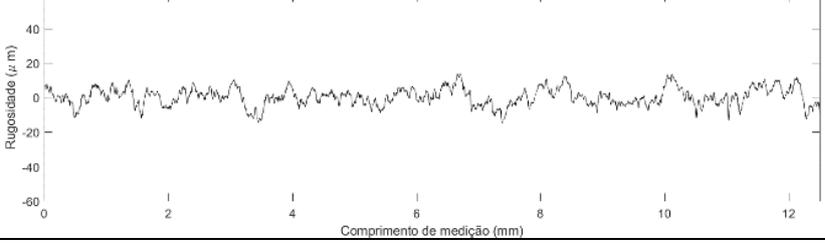
Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm	<p style="text-align: center;">Perfil 6101</p> 	Ra: 4,204 Rz: 28,494
1,5-3,0 mm	<p style="text-align: center;">Perfil 6102</p> 	Ra: 3,735 Rz: 25,638
3,0-4,5 mm	<p style="text-align: center;">Perfil 6103</p> 	Ra: 3,761 Rz: 23,892
4,5-6,0 mm	<p style="text-align: center;">Perfil 6104</p> 	Ra: 3,803 Rz: 22,993
6,0-7,5 mm	<p style="text-align: center;">Perfil 6105</p> 	Ra: 4,031 Rz: 23,469
7,5-9,0 mm	<p style="text-align: center;">Perfil 6106</p> 	Ra: 4,079 Rz: 24,796

Tabela A.60 - Amostra 61 – Qualidade  $Q_v$  83,54%. Continuação.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
9,0-10,5 mm	<p>Perfil 6107</p>	Ra: 5,393 Rz: 30,904
10,5-12,0 mm	<p>Perfil 6108</p>	Ra: 7,835 Rz: 37,107

Tabela A.61 - Amostra 62 – Qualidade  $Q_v$  66,43%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
0-1,5 mm	<p>Perfil 6201</p>	Ra: 3,489 Rz: 24,756
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 6202</p>	Ra: 3,325 Rz: 21,004
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 6203</p>	Ra: 3,728 Rz: 22,866
4,5-6,0 mm	<p>Perfil 6204</p>	Ra: 3,972 Rz: 25,927

Tabela A.61 - Amostra 62 – Qualidade  $Q_v$  66,43%. Continuação.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
6,0-7,5 mm	<p>Perfil 6205</p>	Ra: 4,405 Rz: 25,186
7,5-9,0 mm	<p>Perfil 6206</p>	Ra: 4,972 Rz: 27,587
9,0-10,5 mm	<p>Perfil 6207</p>	Ra: 5,944 Rz: 31,522
10,5-12,0 mm	<p>Perfil 6208</p>	Ra: 8,657 Rz: 49,631

Tabela A.62 - Amostra 63 – Qualidade  $Q_v$  88,54%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
0-1,5 mm	<p>Perfil 6301</p>	Ra: 3,487 Rz: 20,877
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 6302</p>	Ra: 3,238 Rz: 20,877

Tabela A.62 - Amostra 63 – Qualidade  $Q_v$  88,54%.

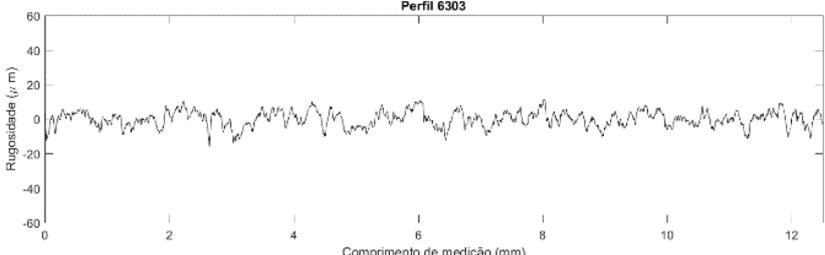
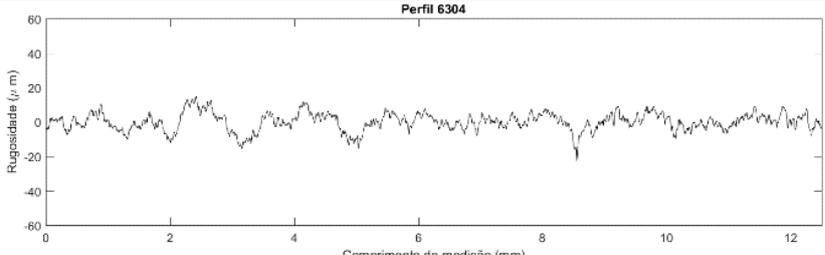
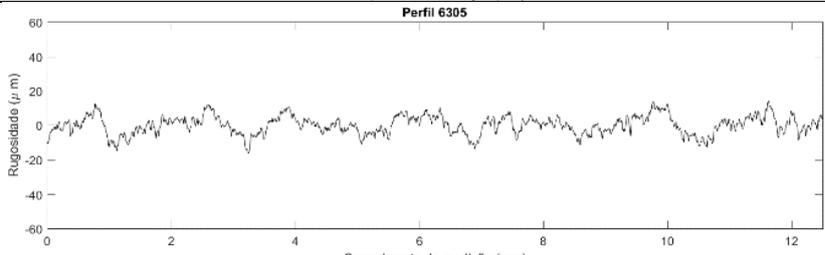
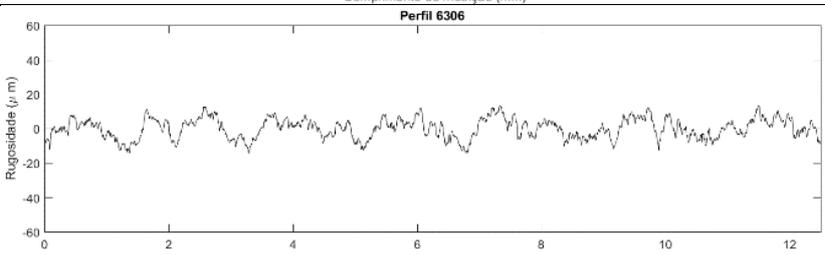
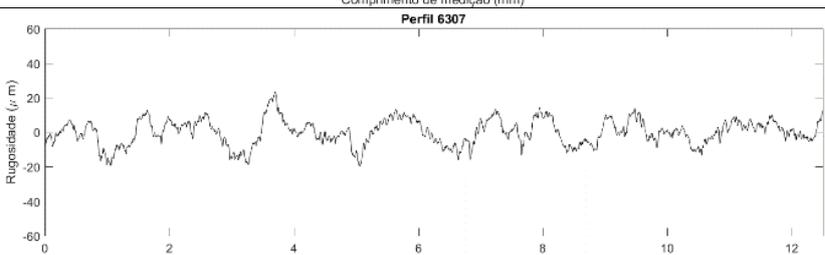
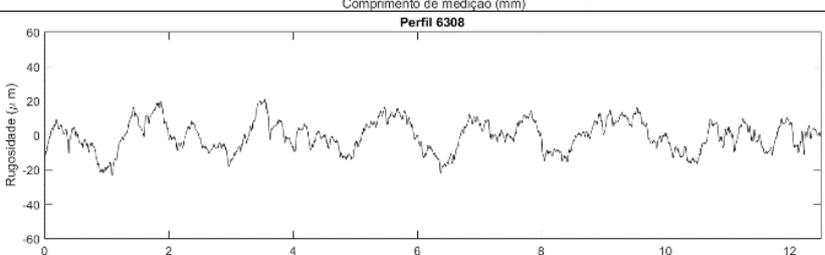
Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
3,0-4,5 mm		Ra: 3,640 Rz: 22,918
4,5-6,0 mm		Ra: 3,978 Rz: 25,971
6,0-7,5 mm		Ra: 4,306 Rz: 26,472
7,5-9,0 mm		Ra: 4,842 Rz: 25,790
9,0-10,5 mm		Ra: 5,893 Rz: 32,137
10,5-12,0 mm		Ra: 7,185 Rz: 35,962

Tabela A.63 - Amostra 64 – Qualidade  $Q_v$  51,48%.

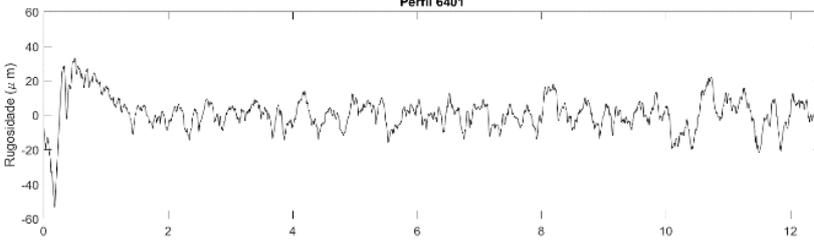
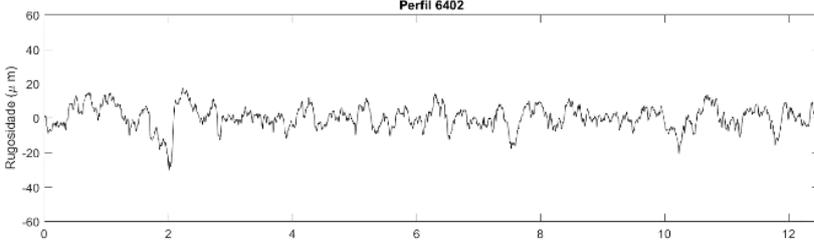
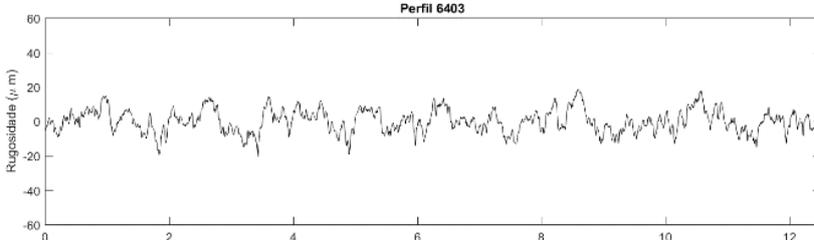
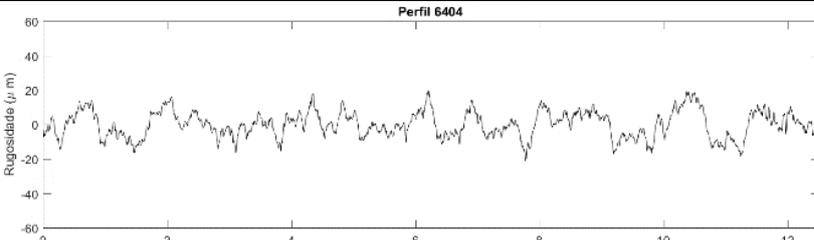
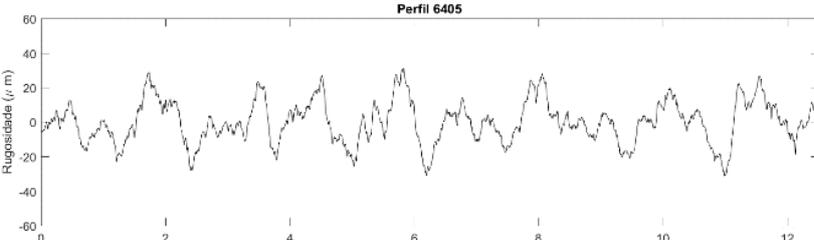
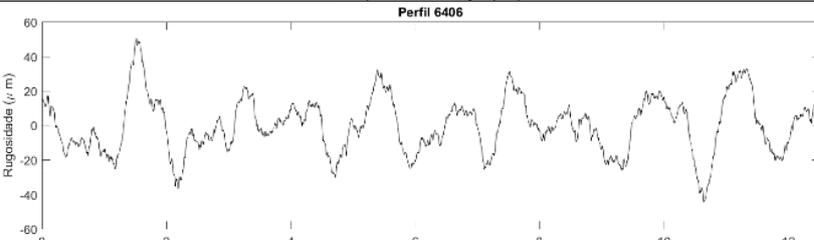
Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm		Ra: 6,965 Rz: 43,932
1,5-3,0 mm		Ra: 5,034 Rz: 32,473
3,0-4,5 mm		Ra: 5,300 Rz: 32,473
4,5-6,0 mm		Ra: 6,246 Rz: 34,267
6,0-7,5 mm		Ra: 9,651 Rz: 55,079
7,5-9,0 mm		Ra: 12,837 Rz: 66,438

Tabela A.63 - Amostra 64 – Qualidade  $Q_v$  51,48%. Continuação.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
9,0-10,5 mm		Ra: 15,054 Rz: 74,672
10,5-12,0 mm		Ra: 19,042 Rz: 86,735

Tabela A.64 - Amostra 65 – Qualidade  $Q_v$  74,77%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm		Ra: 3,651 Rz: 24,991
1,5-3,0 mm		Ra: 4,018 Rz: 23,293
3,0-4,5 mm		Ra: 3,935 Rz: 25,179
4,5-6,0 mm		Ra: 4,357 Rz: 25,365

Tabela A.64 - Amostra 65 – Qualidade  $Q_v$  74,77%. Continuação.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
6,0-7,5 mm		Ra: 4,610 Rz: 26,149
7,5-9,0 mm		Ra: 4,774 Rz: 25,781
9,0-10,5 mm		Ra: 6,276 Rz: 34,920
10,5-12,0 mm		Ra: 7,626 Rz: 40,449

Tabela A.65 - Amostra 66 – Qualidade  $Q_v$  63,19%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm		Ra: 4,267 Rz: 29,675
1,5-3,0 mm		Ra: 3,381 Rz: 20,932

Tabela A.65 - Amostra 66 – Qualidade  $Q_v$  63,19%. Continuação.

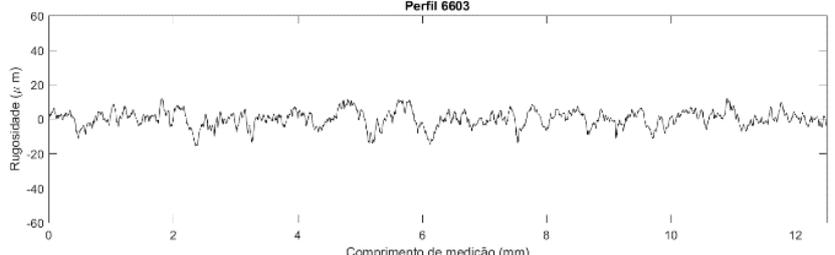
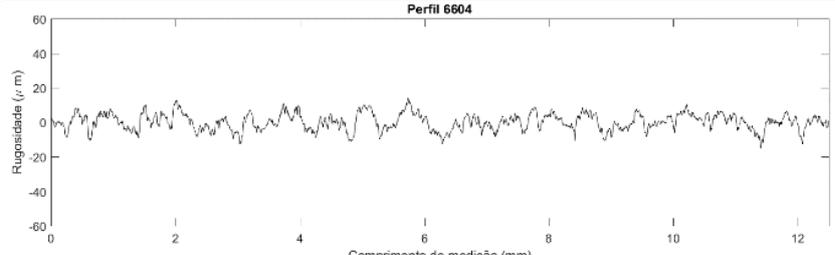
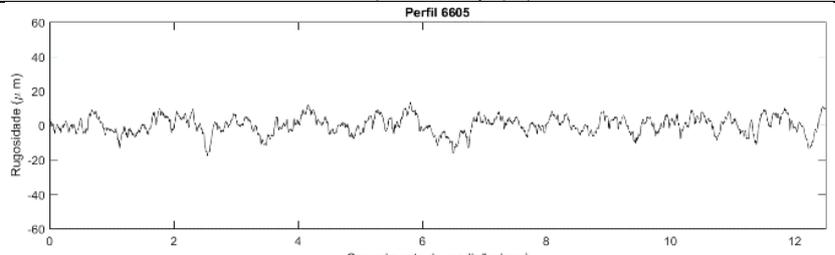
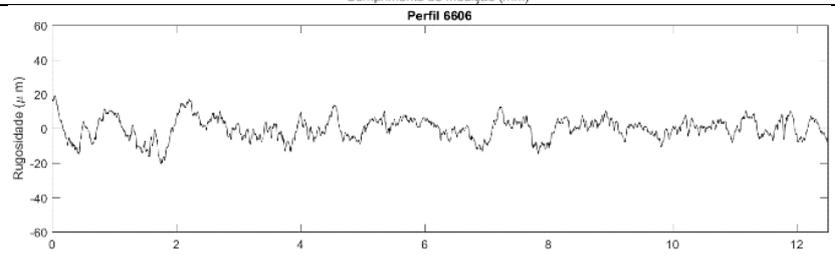
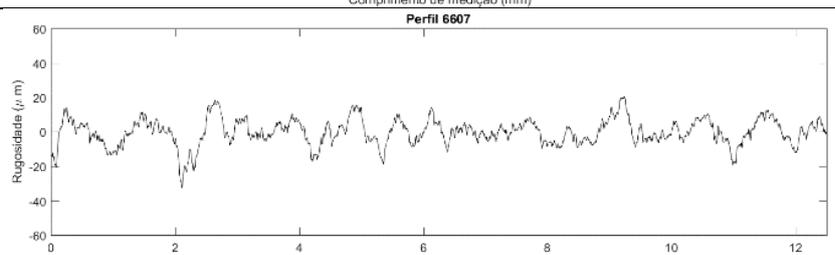
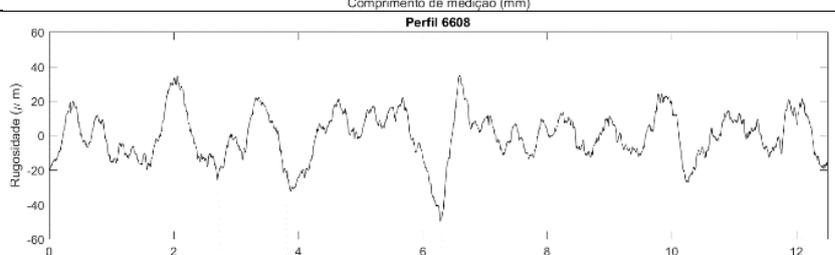
Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
3,0-4,5 mm	 <p style="text-align: center;">Perfil 6603</p>	Ra: 3,701 Rz: 24,141
4,5-6,0 mm	 <p style="text-align: center;">Perfil 6604</p>	Ra: 3,877 Rz: 23,669
6,0-7,5 mm	 <p style="text-align: center;">Perfil 6605</p>	Ra: 4,011 Rz: 25,071
7,5-9,0 mm	 <p style="text-align: center;">Perfil 6606</p>	Ra: 4,973 Rz: 27,487
9,0-10,5 mm	 <p style="text-align: center;">Perfil 6607</p>	Ra: 5,873 Rz: 35,584
10,5- 12,0 mm	 <p style="text-align: center;">Perfil 6608</p>	Ra: 11,26 Rz: 56,092

Tabela A.66 - Amostra 67 – Qualidade  $Q_v$  100%.

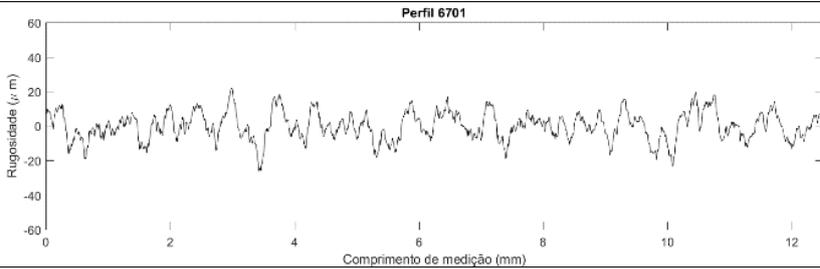
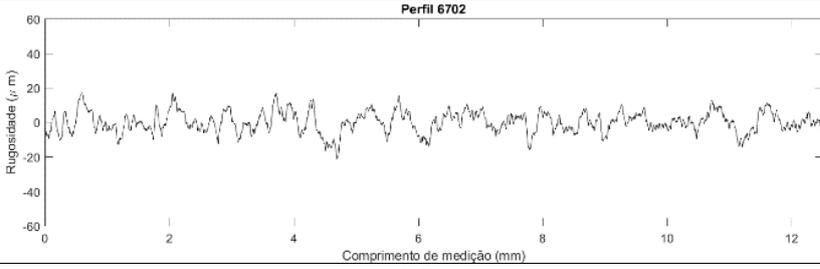
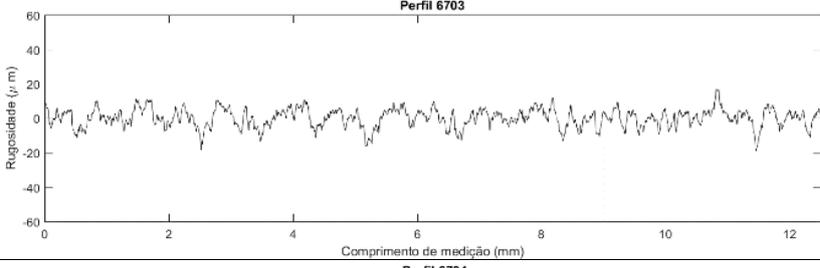
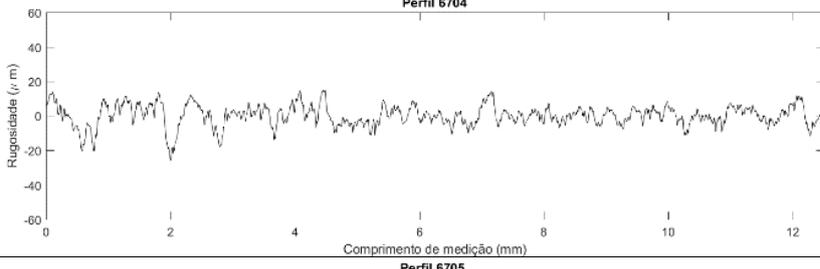
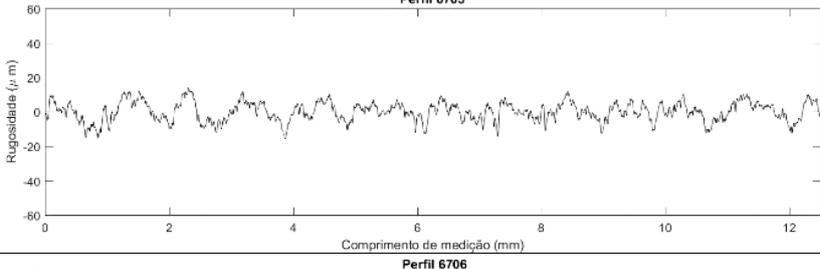
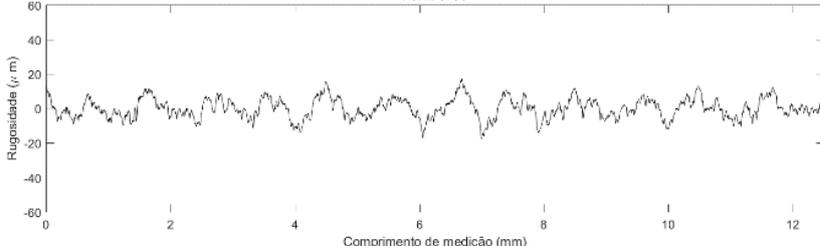
Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm	 <p>Perfil 6701</p>	Ra: 6,443 Rz: 38,979
1,5-3,0 mm	 <p>Perfil 6702</p>	Ra: 4,836 Rz: 30,293
3,0-4,5 mm	 <p>Perfil 6703</p>	Ra: 4,228 Rz: 27,826
4,5-6,0 mm	 <p>Perfil 6704</p>	Ra: 4,631 Rz: 27,537
6,0-7,5 mm	 <p>Perfil 6705</p>	Ra: 4,518 Rz: 25,572
7,5-9,0 mm	 <p>Perfil 6706</p>	Ra: 4,679 Rz: 27,579

Tabela A.66 - Amostra 67 – Qualidade  $Q_v$  100%. Continuação.

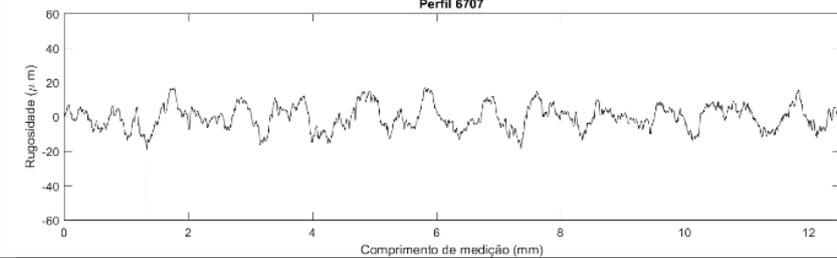
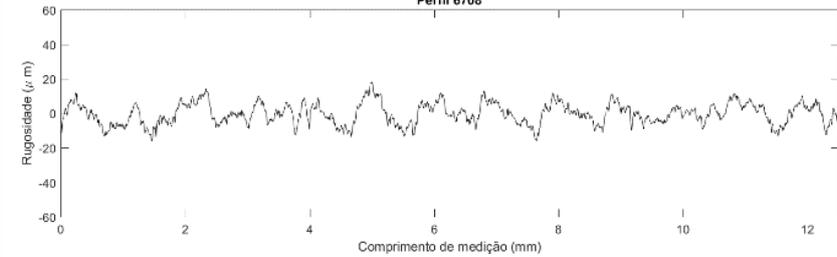
Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
9,0-10,5 mm	<p>Perfil 6707</p> 	<p>Ra: 5,719 Rz: 32,144</p>
10,5- 12,0 mm	<p>Perfil 6708</p> 	<p>Ra: 5,080 Rz: 29,306</p>

Tabela A.67 - Amostra 68 – Qualidade  $Q_v$  42,50%.

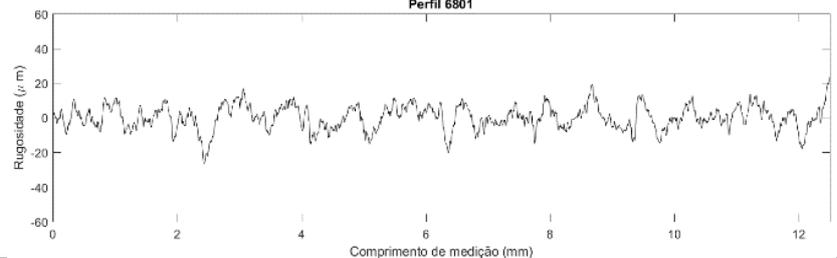
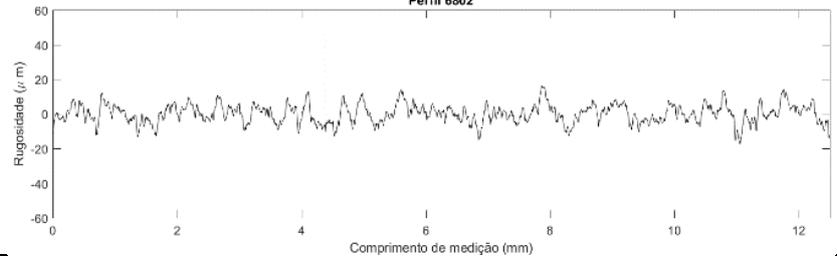
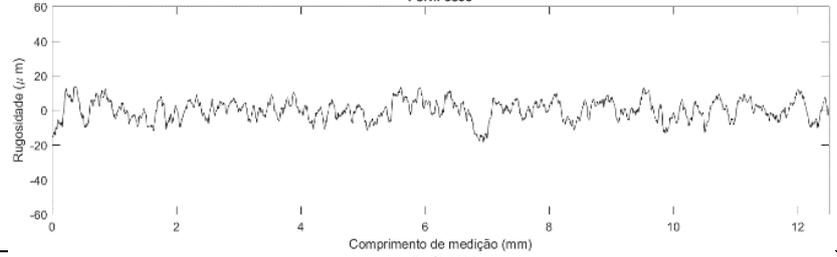
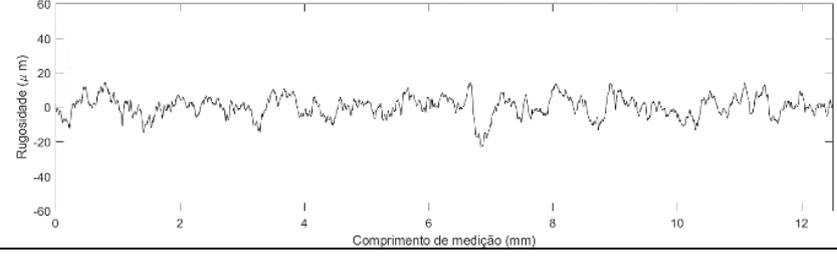
Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm	<p>Perfil 6801</p> 	<p>Ra: 5,537 Rz: 36,363</p>
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 6802</p> 	<p>Ra: 4,322 Rz: 28,119</p>
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 6803</p> 	<p>Ra: 4,729 Rz: 26,781</p>
4,5-6,0 mm	<p>Perfil 6804</p> 	<p>Ra: 4,699 Rz: 29,236</p>

Tabela A.67 - Amostra 68 – Qualidade  $Q_v$  42,50%. Continuação.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
6,0-7,5 mm	<p>Perfil 6805</p>	Ra: 5,490 Rz: 31,081
7,5-9,0 mm	<p>Perfil 6806</p>	Ra: 6,106 Rz: 32,249
9,0-10,5 mm	<p>Perfil 6807</p>	Ra: 7,183 Rz: 37,407
10,5-12,0 mm	<p>Perfil 6808</p>	Ra: 8,486 Rz: 44,514

Tabela A.68 - Amostra 69 – Qualidade  $Q_v$  64,46%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
0-1,5 mm	<p>Perfil 6901</p>	Ra: 3,937 Rz: 25,846
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 6902</p>	Ra: 3,916 Rz: 24,166

Tabela A.68 - Amostra 69 – Qualidade  $Q_v$  64,46%. Continuação.

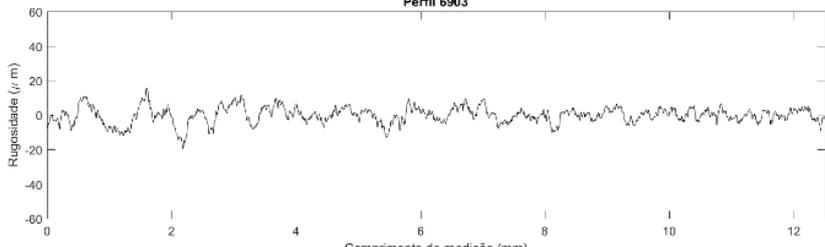
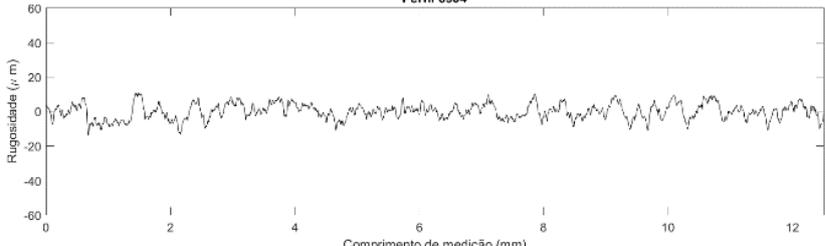
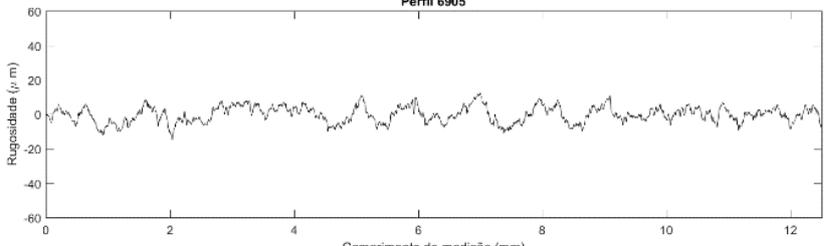
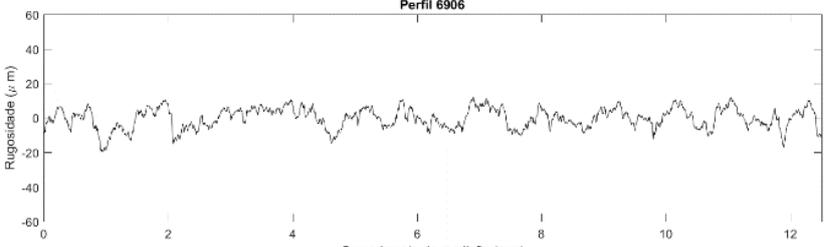
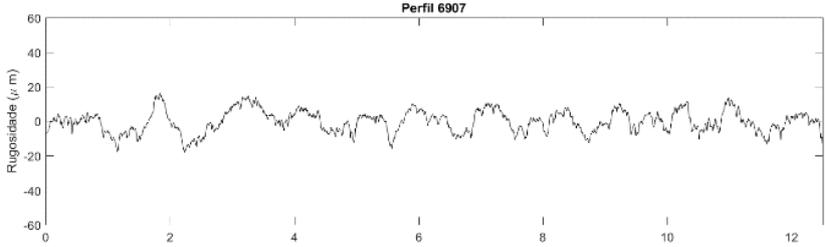
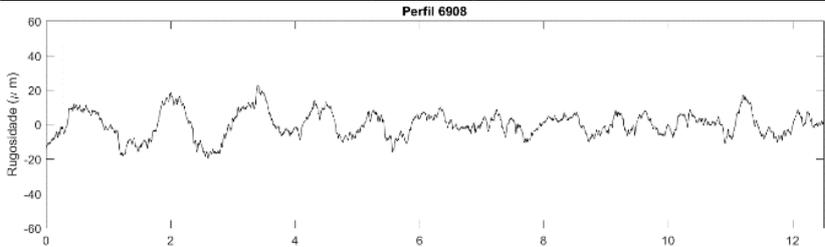
Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
3,0-4,5 mm		Ra: 3,604 Rz: 22,760
4,5-6,0 mm		Ra: 3,642 Rz: 20,478
6,0-7,5 mm		Ra: 3,843 Rz: 20,292
7,5-9,0 mm		Ra: 4,842 Rz: 25,579
9,0-10,5 mm		Ra: 5,156 Rz: 27,564
10,5- 12,0 mm		Ra: 6,008 Rz: 30,469

Tabela A.69 - Amostra 70 – Qualidade  $Q_v$  74,97%.

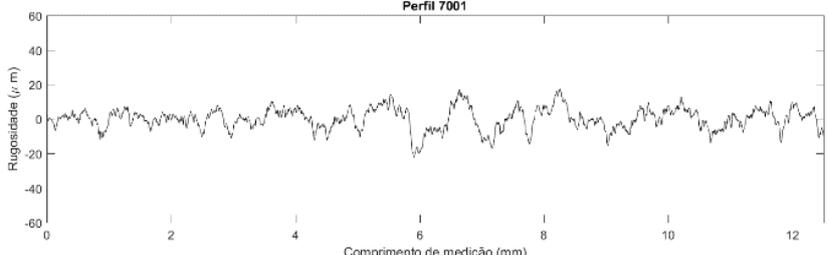
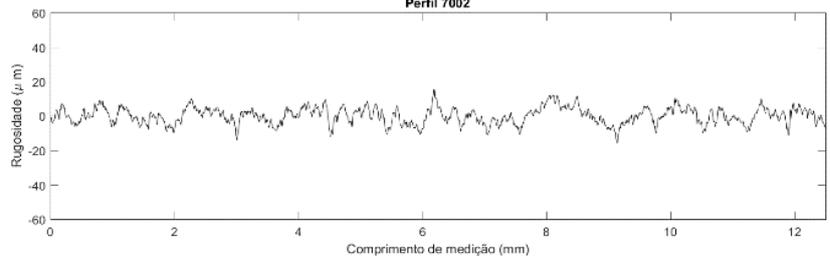
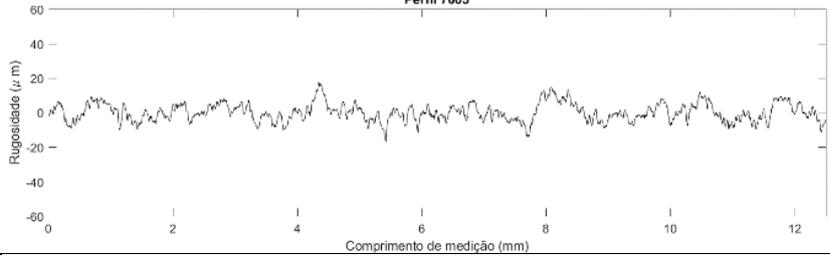
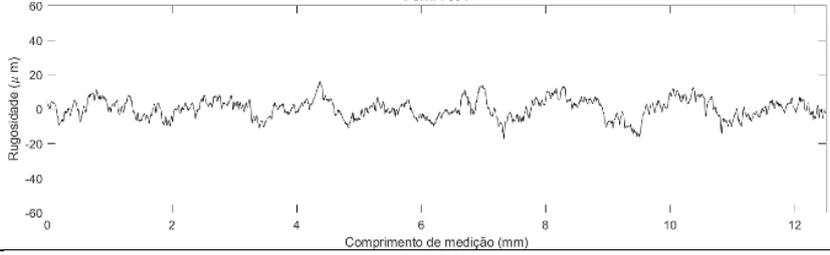
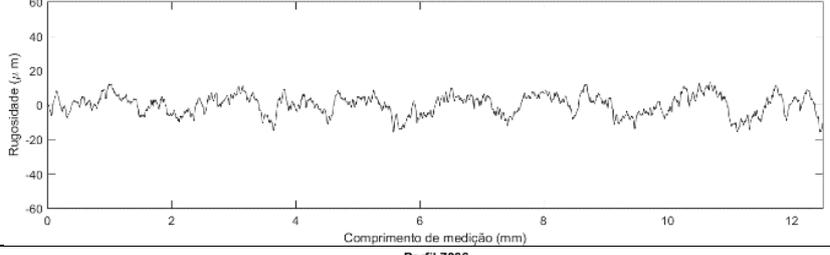
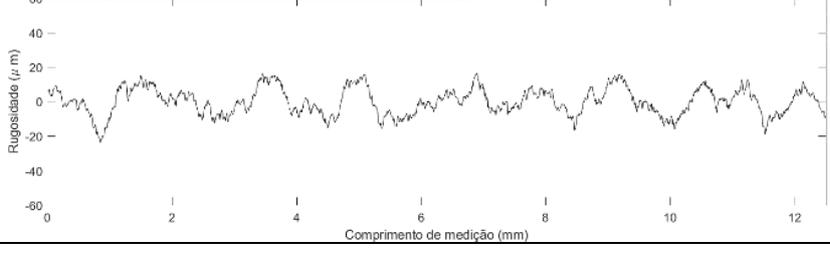
Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm		Ra: 4,883 Rz: 28,204
1,5-3,0 mm		Ra: 3,872 Rz: 24,091
3,0-4,5 mm		Ra: 4,159 Rz: 24,820
4,5-6,0 mm		Ra: 4,504 Rz: 27,082
6,0-7,5 mm		Ra: 4,857 Rz: 25,858
7,5-9,0 mm		Ra: 6,339 Rz: 33,404

Tabela A.69 - Amostra 70 – Qualidade  $Q_v$  74,97%. Continuação.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
9,0-10,5 mm		Ra: 7,233 Rz: 39,940
10,5-12,0 mm		Ra: 7,672 Rz: 39,695

Tabela A.70 - Amostra 71 – Qualidade  $Q_v$  37,90%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm		Ra: 4,566 Rz: 29,558
1,5-3,0 mm		Ra: 3,889 Rz: 25,375
3,0-4,5 mm		Ra: 4,545 Rz: 27,767
4,5-6,0 mm		Ra: 5,460 Rz: 30,937

Tabela A.71 - Amostra 71 – Qualidade  $Q_v$  37,90%. Continuação.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
6,0-7,5 mm	<p>Perfil 7105</p> <p>Rugosidade (<math>\mu</math>m)</p> <p>Comprimento de medição (mm)</p>	<p>Ra: 7,625 Rz: 43,456</p>
7,5-9,0 mm	<p>Perfil 7106</p> <p>Rugosidade (<math>\mu</math>m)</p> <p>Comprimento de medição (mm)</p>	<p>Ra: 9,655 Rz: 47,105</p>
9,0-10,5 mm	<p>Perfil 7107</p> <p>Rugosidade (<math>\mu</math>m)</p> <p>Comprimento de medição (mm)</p>	<p>Ra: 12,010 Rz: 58,928</p>
10,5-12,0 mm	<p>Perfil 7108</p> <p>Rugosidade (<math>\mu</math>m)</p> <p>Comprimento de medição (mm)</p>	<p>Ra: 18,770 Rz: 88,846</p>

Tabela A.71 - Amostra 72 – Qualidade  $Q_v$  61,69%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
0-1,5 mm	<p>Perfil 7201</p> <p>Rugosidade (<math>\mu</math>m)</p> <p>Comprimento de medição (mm)</p>	<p>Ra: 2,904 Rz: 18,812</p>
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 7202</p> <p>Rugosidade (<math>\mu</math>m)</p> <p>Comprimento de medição (mm)</p>	<p>Ra: 2,948 Rz: 23,316</p>

Tabela A.71 - Amostra 72 – Qualidade  $Q_v$  61,69%. Continuação.

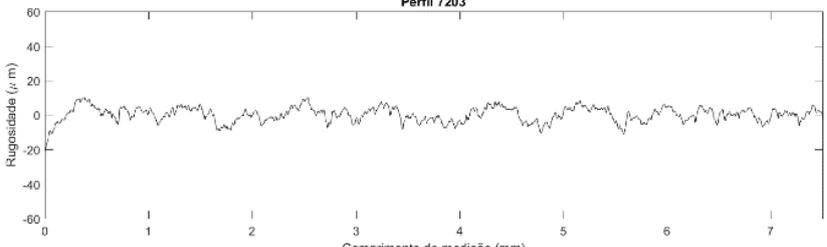
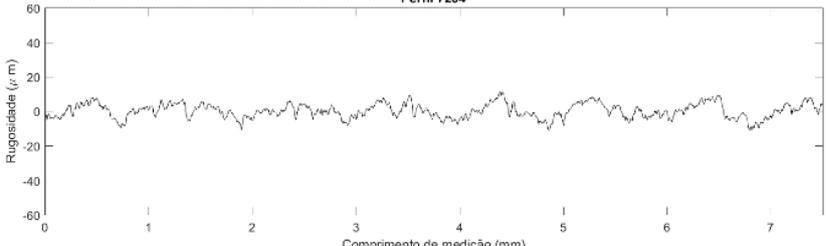
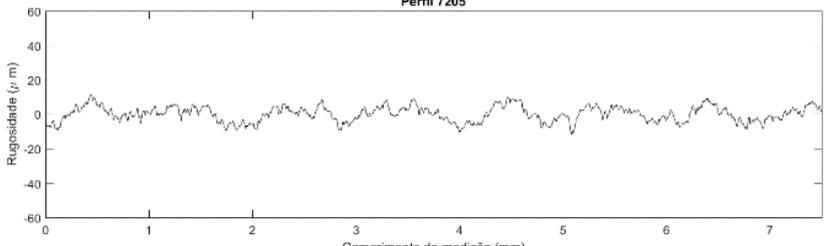
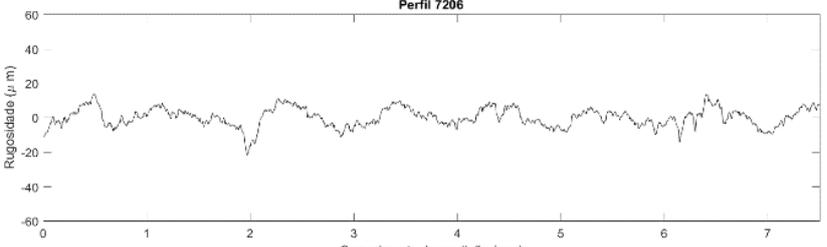
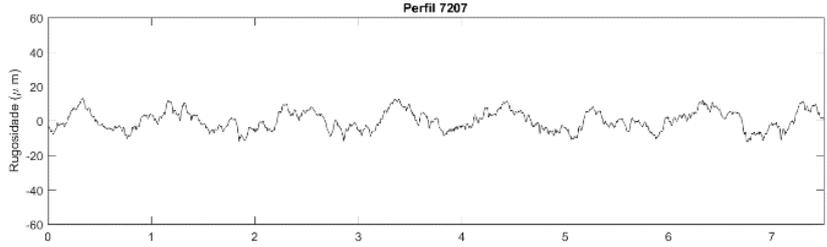
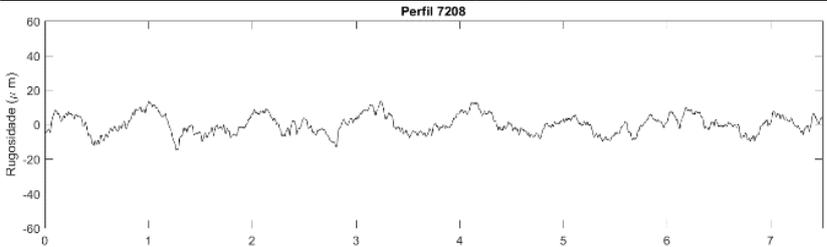
Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
3,0-4,5 mm	 <p>Perfil 7203</p>	Ra: 3,455 Rz: 24,106
4,5-6,0 mm	 <p>Perfil 7204</p>	Ra: 3,444 Rz: 20,305
6,0-7,5 mm	 <p>Perfil 7205</p>	Ra: 3,642 Rz: 20,815
7,5-9,0 mm	 <p>Perfil 7206</p>	Ra: 4,361 Rz: 28,043
9,0-10,5 mm	 <p>Perfil 7207</p>	Ra: 4,777 Rz: 24,626
10,5- 12,0 mm	 <p>Perfil 7208</p>	Ra: 4,510 Rz: 24,983

Tabela A.72 - Amostra 73 – Qualidade  $Q_v$  76,55%.

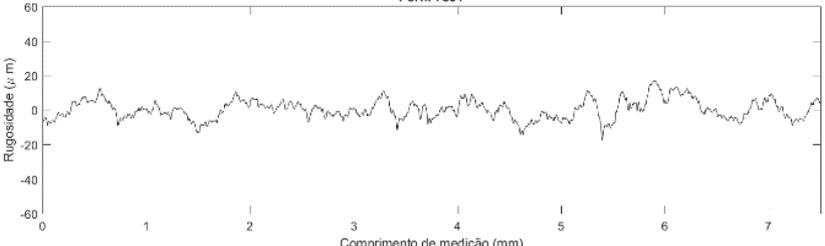
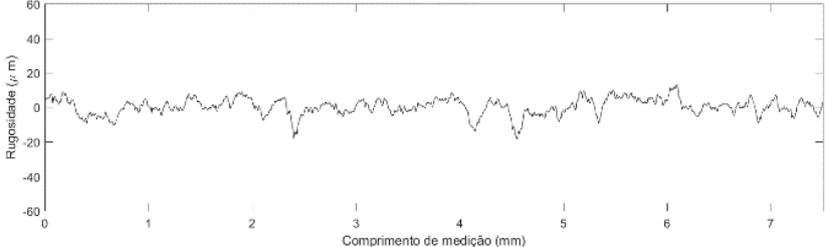
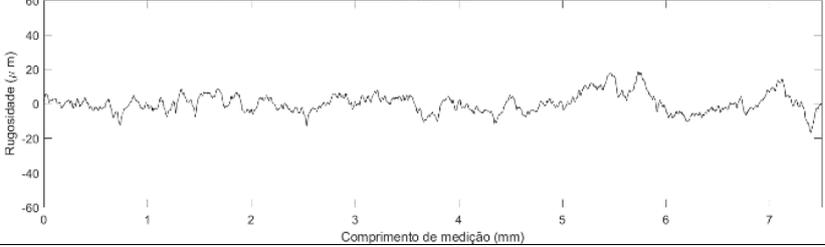
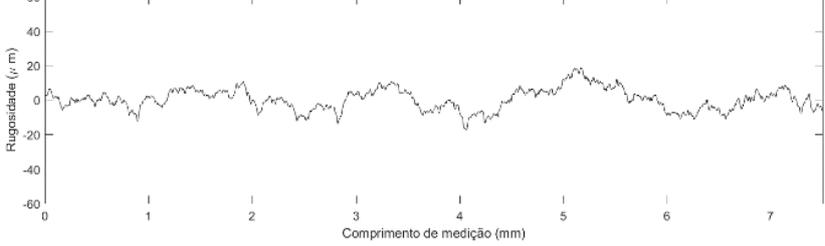
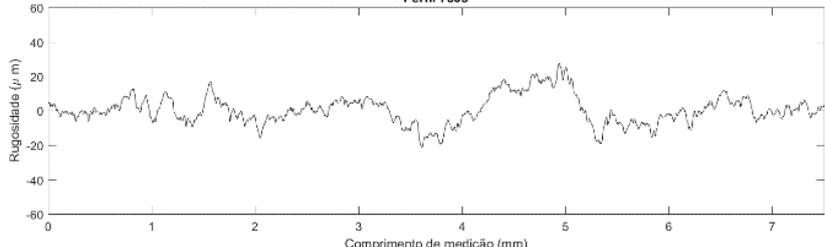
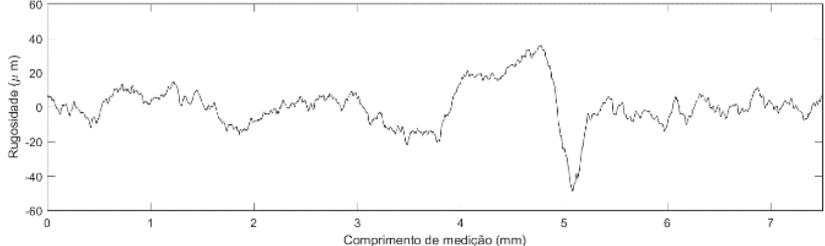
Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm	<p style="text-align: center;">Perfil 7301</p> 	<p style="text-align: center;">Ra: 4,552 Rz: 28,600</p>
1,5-3,0 mm	<p style="text-align: center;">Perfil 7302</p> 	<p style="text-align: center;">Ra: 3,721 Rz: 25,428</p>
3,0-4,5 mm	<p style="text-align: center;">Perfil 7303</p> 	<p style="text-align: center;">Ra: 4,261 Rz: 25,511</p>
4,5-6,0 mm	<p style="text-align: center;">Perfil 7304</p> 	<p style="text-align: center;">Ra: 5,044 Rz: 27,658</p>
6,0-7,5 mm	<p style="text-align: center;">Perfil 7305</p> 	<p style="text-align: center;">Ra: 6,387 Rz: 41,945</p>
7,5-9,0 mm	<p style="text-align: center;">Perfil 7306</p> 	<p style="text-align: center;">Ra: 8,793 Rz: 50,611</p>

Tabela A.72 - Amostra 73 – Qualidade  $Q_v$  76,55%. Continuação.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
9,0-10,5 mm	<p>Perfil 7307</p>	Ra: 10,290 Rz: 52,023
10,5-12,0 mm	<p>Perfil 7308</p>	Ra: 12,310 Rz: 51,029

Tabela A.73 - Amostra 74 – Qualidade  $Q_v$  46,08%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
0-1,5 mm	<p>Perfil 7401</p>	Ra: 3,331 Rz: 24,276
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 7402</p>	Ra: 3,657 Rz: 22,384
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 7403</p>	Ra: 3,918 Rz: 25,606
4,5-6,0 mm	<p>Perfil 7404</p>	Ra: 4,164 Rz: 26,868

Tabela A.73 - Amostra 74 – Qualidade  $Q_v$  46,08%. Continuação.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
6,0-7,5 mm	<p>Perfil 7405</p>	Ra: 4,126 Rz: 25,722
7,5-9,0 mm	<p>Perfil 7406</p>	Ra: 4,641 Rz: 28,960
9,0-10,5 mm	<p>Perfil 7407</p>	Ra: 6,554 Rz: 32,578
10,5-12,0 mm	<p>Perfil 7408</p>	Ra: 8,993 Rz: 43,967

Tabela A.74 - Amostra 75 – Qualidade  $Q_v$  60,27%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
0-1,5 mm	<p>Perfil 7501</p>	Ra: 5,871 Rz: 35,514
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 7502</p>	Ra: 3,892 Rz: 24,502

Tabela A.75 - Amostra 75 – Qualidade  $Q_v$  60,27%. Continuação.

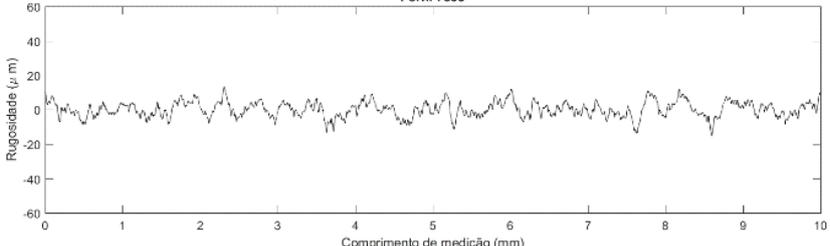
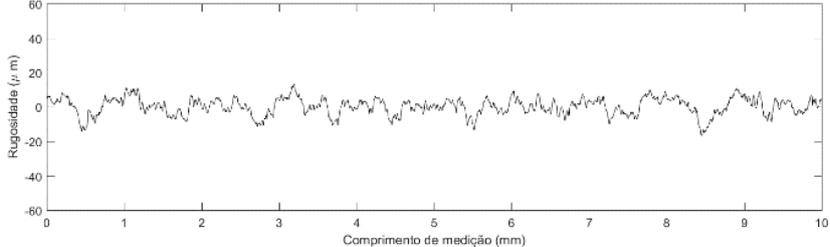
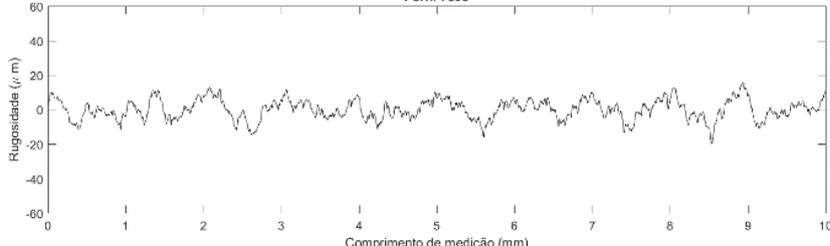
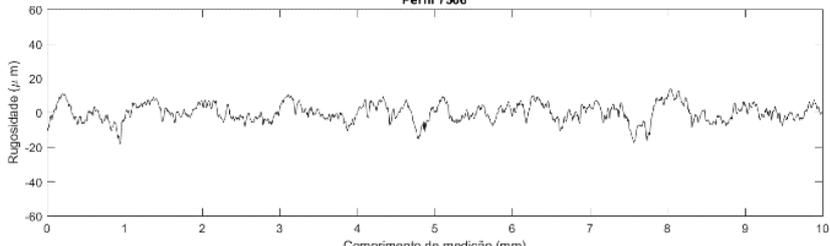
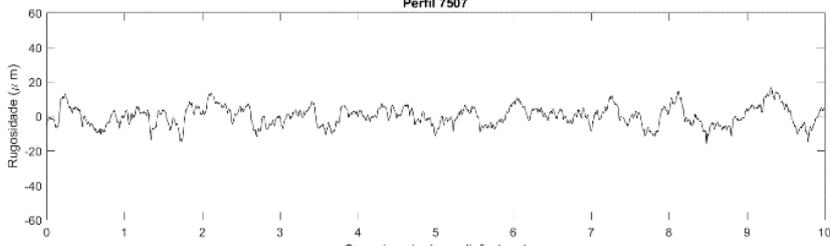
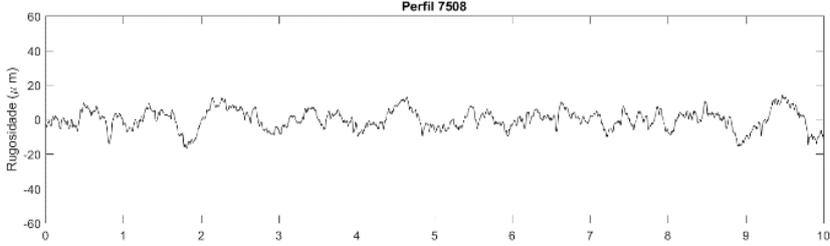
Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
3,0-4,5 mm	<p style="text-align: center;"><b>Perfil 7503</b></p> 	<p style="text-align: center;">Ra: 3,622 Rz: 23,812</p>
4,5-6,0 mm	<p style="text-align: center;"><b>Perfil 7504</b></p> 	<p style="text-align: center;">Ra: 4,005 Rz: 25,091</p>
6,0-7,5 mm	<p style="text-align: center;"><b>Perfil 7505</b></p> 	<p style="text-align: center;">Ra: 4,711 Rz: 28,296</p>
7,5-9,0 mm	<p style="text-align: center;"><b>Perfil 7506</b></p> 	<p style="text-align: center;">Ra: 4,201 Rz: 26,716</p>
9,0-10,5 mm	<p style="text-align: center;"><b>Perfil 7507</b></p> 	<p style="text-align: center;">Ra: 4,516 Rz: 25,825</p>
10,5-12,0 mm	<p style="text-align: center;"><b>Perfil 7508</b></p> 	<p style="text-align: center;">Ra: 4,601 Rz: 25,838</p>

Tabela A.75 - Amostra 76 – Qualidade  $Q_v$  47,23%.

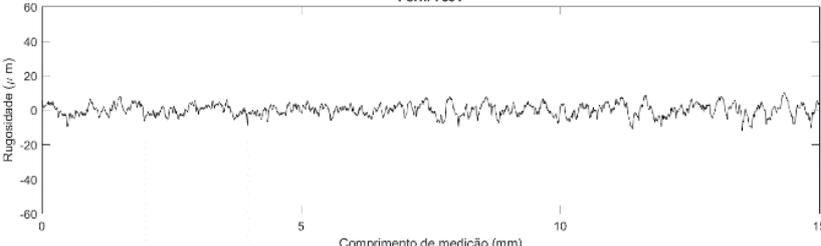
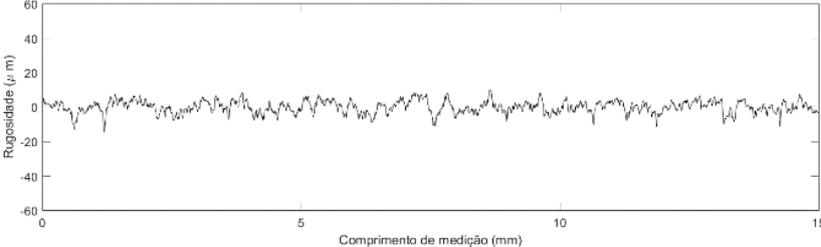
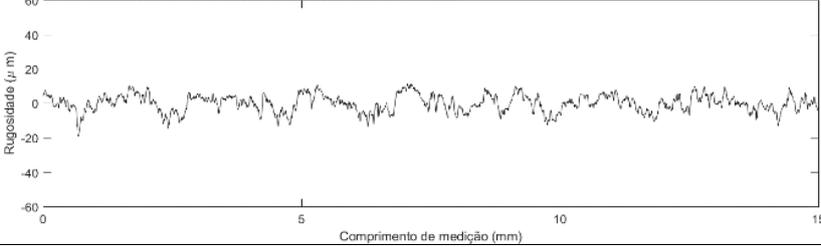
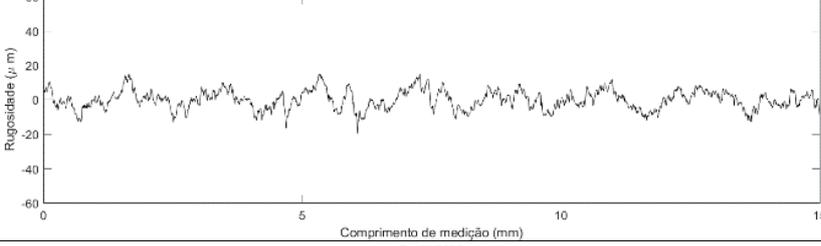
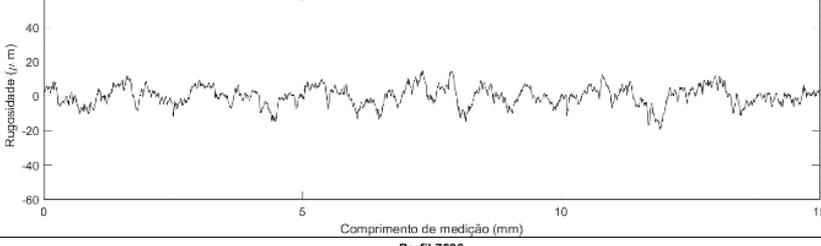
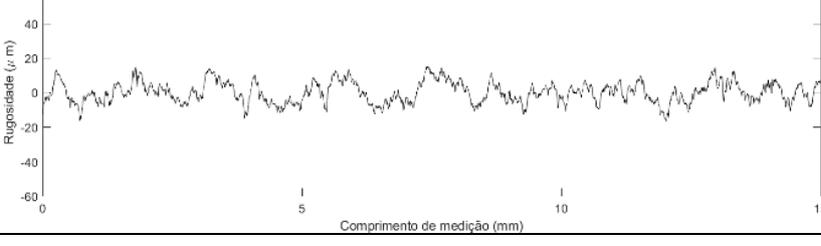
Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm	<p style="text-align: center;"><b>Perfil 7601</b></p>  <p style="text-align: center;">Comprimento de medição (mm)</p>	Ra: 2,810 Rz: 17,830
1,5-3,0 mm	<p style="text-align: center;"><b>Perfil 7602</b></p>  <p style="text-align: center;">Comprimento de medição (mm)</p>	Ra: 2,887 Rz: 18,880
3,0-4,5 mm	<p style="text-align: center;"><b>Perfil 7603</b></p>  <p style="text-align: center;">Comprimento de medição (mm)</p>	Ra: 4,029 Rz: 23,333
4,5-6,0 mm	<p style="text-align: center;"><b>Perfil 7604</b></p>  <p style="text-align: center;">Comprimento de medição (mm)</p>	Ra: 4,403 Rz: 25,910
6,0-7,5 mm	<p style="text-align: center;"><b>Perfil 7605</b></p>  <p style="text-align: center;">Comprimento de medição (mm)</p>	Ra: 4,367 Rz: 26,587
7,5-9,0 mm	<p style="text-align: center;"><b>Perfil 7606</b></p>  <p style="text-align: center;">Comprimento de medição (mm)</p>	Ra: 5,034 Rz: 27,748

Tabela A.75 - Amostra 76 – Qualidade  $Q_v$  47,23%. Continuação.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
9,0-10,5 mm	<p>Perfil 7607</p>	Ra: 6,015 Rz: 33,687
10,5-12,0 mm	<p>Perfil 7608</p>	Ra: 7,686 Rz: 42,728
12,0-13,5 mm	<p>Perfil 7609</p>	Ra: 9,083 Rz: 53,004

Tabela A.76 - Amostra 77 – Qualidade  $Q_v$  45,54%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
0-1,5 mm	<p>Perfil 7701</p>	Ra: 4,553 Rz: 24,833
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 7702</p>	Ra: 4,098 Rz: 28,251
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 7703</p>	Ra: 4,935 Rz: 26,667

Tabela A.77 - Amostra 77 – Qualidade  $Q_v$  45,54%. Continuação.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
4,5-6,0 mm	<p>Perfil 7704</p>	Ra: 5,157 Rz: 29,100
6,0-7,5 mm	<p>Perfil 7705</p>	Ra: 5,074 Rz: 28,251
7,5-9,0 mm	<p>Perfil 7706</p>	Ra: 5,499 Rz: 31,359
9,0-10,5 mm	<p>Perfil 7707</p>	Ra: 5,572 Rz: 33,531
10,5-12,0 mm	<p>Perfil 7708</p>	Ra: 7,746 Rz: 43,417

Tabela A.77 - Amostra 78 – Qualidade  $Q_v$  63,05%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu$ m)
0-1,5 mm	<p>Perfil 7801</p>	Ra: 4,225 Rz: 26,667

Tabela A.77 - Amostra 78 – Qualidade  $Q_v$  63,05%. Continuação.

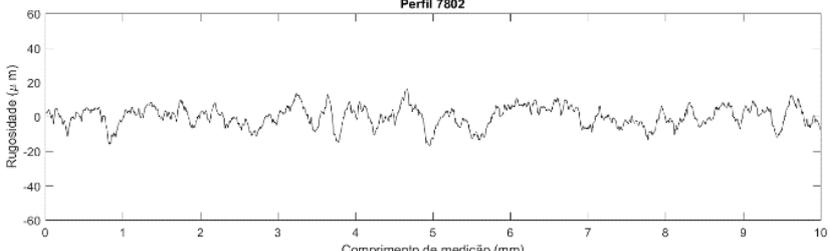
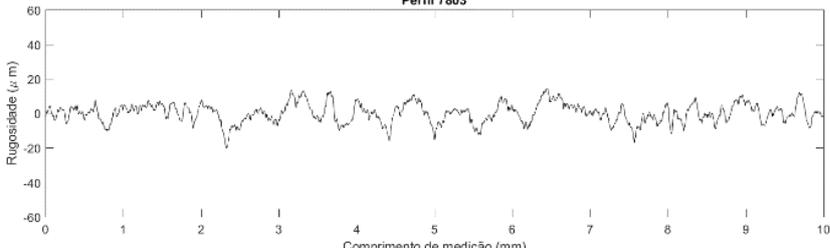
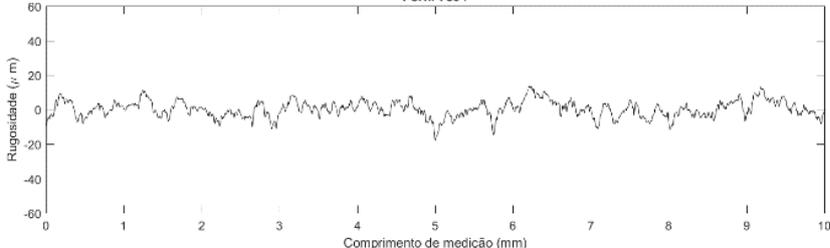
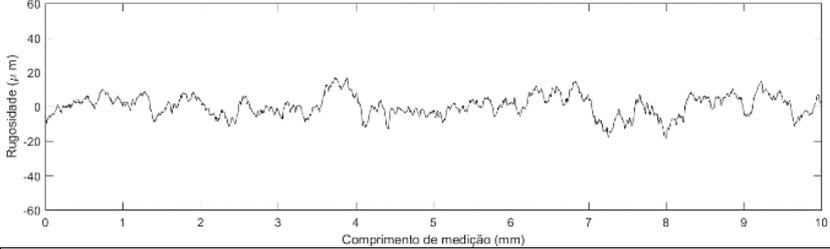
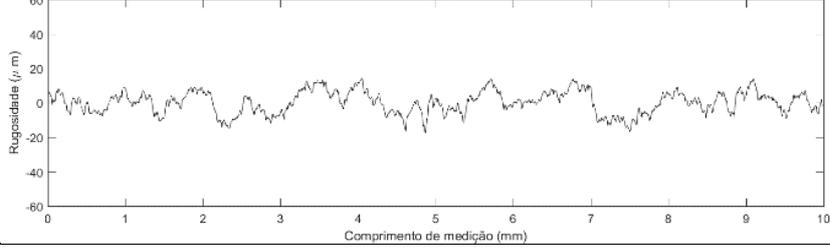
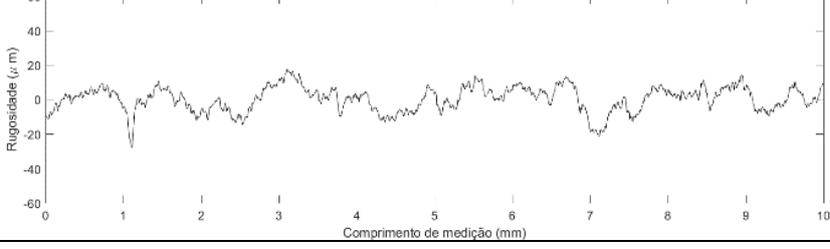
Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
1,5-3,0 mm		Ra: 4,757 Rz: 27,212
3,0-4,5 mm		Ra: 4,460 Rz: 29,037
4,5-6,0 mm		Ra: 3,760 Rz: 25,853
6,0-7,5 mm		Ra: 4,995 Rz: 24,429
7,5-9,0 mm		Ra: 5,368 Rz: 29,139
9,0-10,5 mm		Ra: 5,869 Rz: 33,297

Tabela A.77 - Amostra 78 – Qualidade  $Q_v$  63,05%. Continuação.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
10,5- 12,0 mm	<p>Perfil 7808</p>	Ra: 8,142 Rz: 43,382
12,0- 13,5 mm	<p>Perfil 7809</p>	Ra: 8,360 Rz: 44,509
13,5- 15,0 mm	<p>Perfil 7810</p>	12,840; 54,658

Tabela A.78 - Amostra 79 – Qualidade  $Q_v$  87,99%.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm	<p>Perfil 7901</p>	Ra: 4,470 Rz: 27,191
1,5-3,0 mm	<p>Perfil 7902</p>	Ra: 3,894 Rz: 23,177
3,0-4,5 mm	<p>Perfil 7903</p>	Ra: 4,967 Rz: 30,243

Tabela A.78 - Amostra 79 – Qualidade  $Q_v$  87,99%. Continuação.

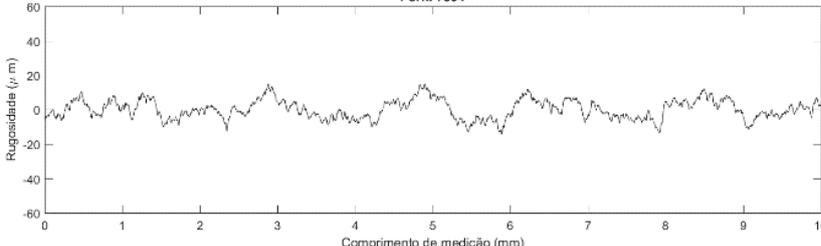
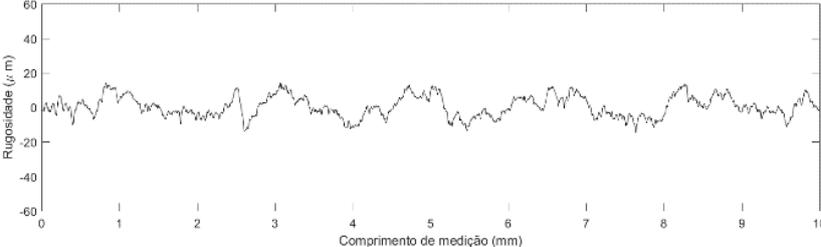
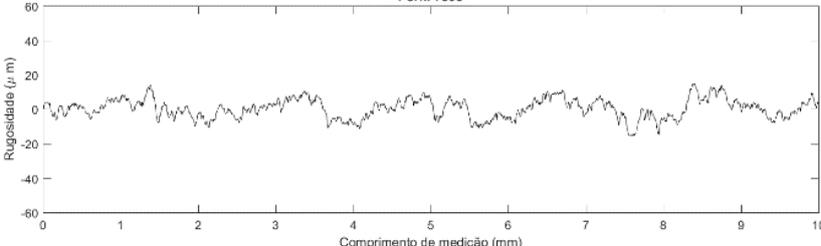
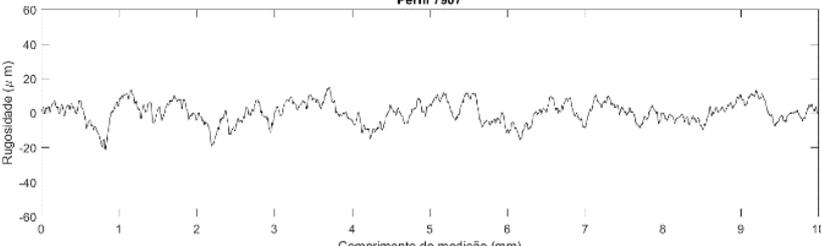
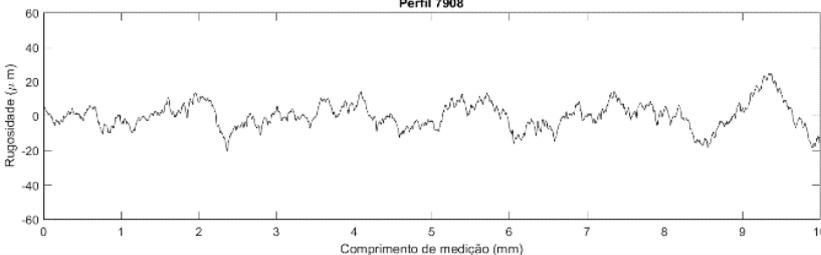
Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
4,5-6,0 mm	<p style="text-align: center;">Perfil 7904</p> 	<p style="text-align: center;">Ra: 4,644 Rz: 25,184</p>
6,0-7,5 mm	<p style="text-align: center;">Perfil 7905</p> 	<p style="text-align: center;">Ra: 5,023 Rz: 26,768</p>
7,5-9,0 mm	<p style="text-align: center;">Perfil 7906</p> 	<p style="text-align: center;">Ra: 4,695 Rz: 24,870</p>
9,0-10,5 mm	<p style="text-align: center;">Perfil 7907</p> 	<p style="text-align: center;">Ra: 5,072 Rz: 28,822</p>
10,5-12,0 mm	<p style="text-align: center;">Perfil 7908</p> 	<p style="text-align: center;">Ra: 5,828 Rz: 33,420</p>

Tabela A.79 - Amostra 80 – Qualidade  $Q_v$  100%.

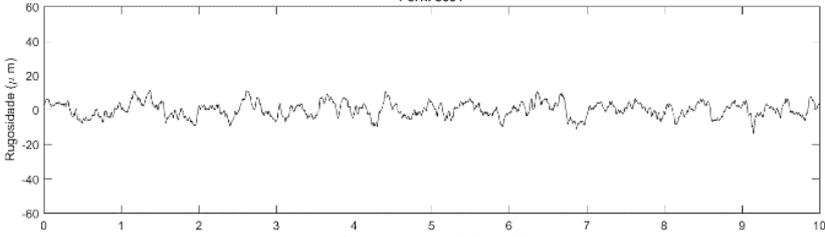
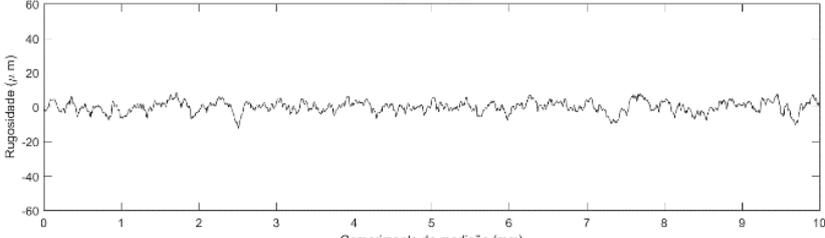
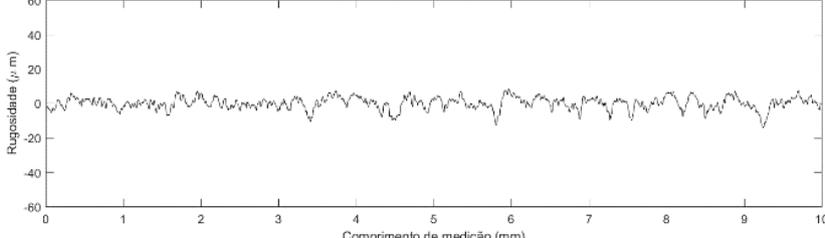
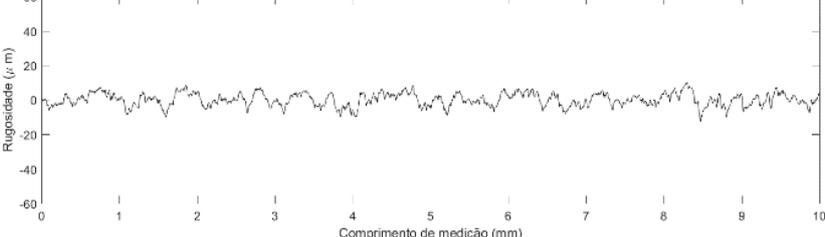
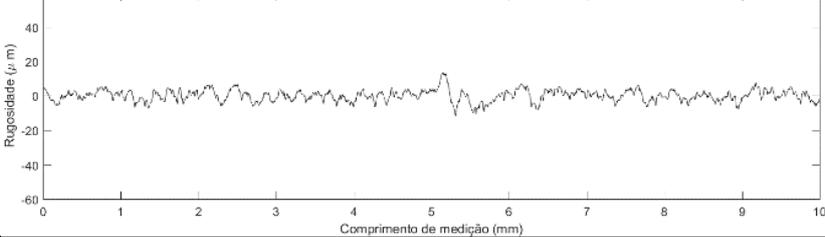
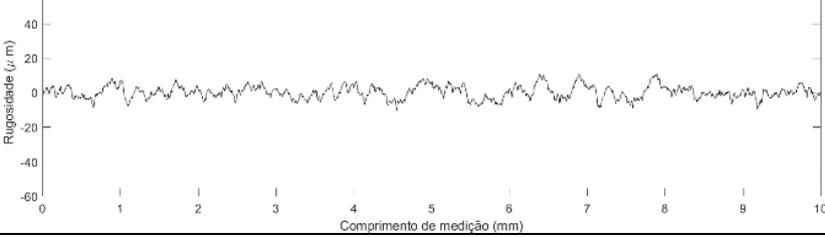
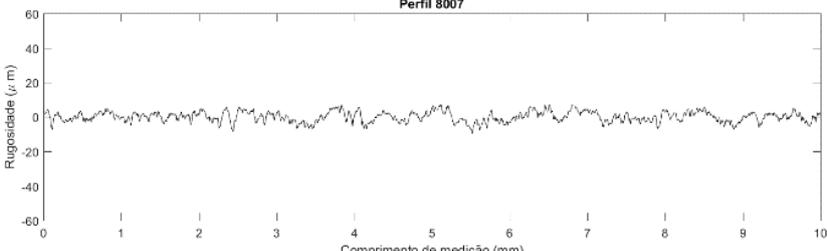
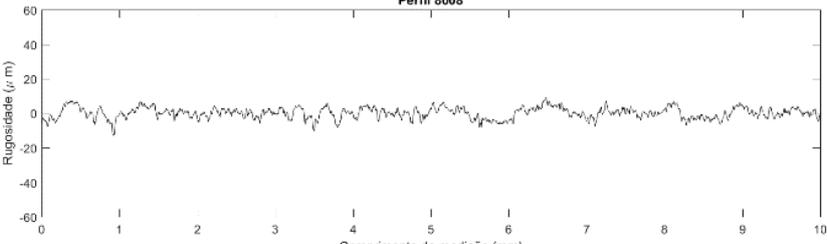
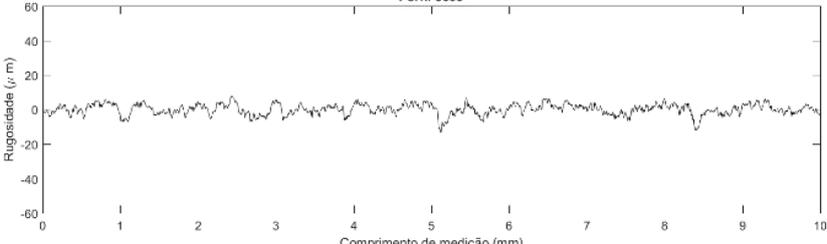
Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
0-1,5 mm	<p style="text-align: center;">Perfil 8001</p> 	<p style="text-align: center;">Ra: 3,493 Rz: 21,241</p>
1,5- 3,0 mm	<p style="text-align: center;">Perfil 8002</p> 	<p style="text-align: center;">Ra: 2,585 Rz: 18,290</p>
3,0- 4,5 mm	<p style="text-align: center;">Perfil 8003</p> 	<p style="text-align: center;">Ra: 2,757 Rz: 18,756</p>
4,5- 6,0 mm	<p style="text-align: center;">Perfil 8004</p> 	<p style="text-align: center;">Ra: 3,092 Rz: 18,830</p>
6,0- 7,5 mm	<p style="text-align: center;">Perfil 8005</p> 	<p style="text-align: center;">Ra: 2,613 Rz: 16,838</p>
7,5- 9,0 mm	<p style="text-align: center;">Perfil 8006</p> 	<p style="text-align: center;">Ra: 3,015 Rz: 18,852</p>

Tabela A.79 - Amostra 80 – Qualidade  $Q_v$  100%. Continuação.

Prof.	Perfil	Ra-Rz( $\mu\text{m}$ )
9,0- 10,5 mm	 <p>Perfil 8007</p>	Ra: 2,453 Rz: 14,494
10,5- 12,0 mm	 <p>Perfil 8008</p>	Ra: 2,586 Rz: 16,915
12,0- 13,5 mm	 <p>Perfil 8009</p>	Ra: 2,486 Rz: 16,661

## APÊNDICE B – Dados de rugosidade

Tabela B.1 – Medições de Rugosidade – Bloco 01.

Amostra Prof. (mm)	Rugosidade Ra ( $\mu\text{m}$ )			Rugosidade Rz ( $\mu\text{m}$ )		
	0-1,5	1,5-3,0	3,0-4,5	0-1,5	1,5-3,0	3,0-4,5
1	6,761			36,254		
2	3,693	4,533	7,899	26,246	30,296	44,056
3	3,487	4,101	17,055	20,498	21,134	83,638
4	3,001	5,443	8,544	19,352	32,570	40,523
5	3,483	4,191	4,849	21,777	24,894	23,542
6	6,983	5,381	12,001	40,871	37,726	66,165
7	3,233	5,015	6,728	21,680	29,044	37,871
8	4,681	3,900	4,648	32,914	25,605	27,087
9	4,242	4,407	6,678	24,771	25,653	45,497
10	3,465	4,646	24,674	21,292	28,728	129,287
11	7,526	5,141	6,335	47,067	29,625	33,594
12	3,932	3,683	4,682	22,156	25,754	27,023
13	4,557	3,884	6,232	27,877	23,573	34,468
14	4,171	4,979	7,238	26,322	31,713	36,047
15	4,239	5,096	10,989	29,042	34,628	58,136
16	5,737	6,059	12,094	34,800	43,420	70,057
17	5,490	5,486	5,056	30,839	31,310	26,889
18	8,328	6,931	10,054	50,170	38,509	54,286
19	4,546	4,727	6,345	30,354	25,930	36,674
20	3,973	5,141	9,399	29,207	29,172	45,828

Tabela B.2 – Medições de Rugosidade – Bloco 03.

Amostra Prof. (mm)	Rugosidade Ra ( $\mu\text{m}$ )				Rugosidade Rz ( $\mu\text{m}$ )			
	0-1,5	1,5-3,0	3,0-4,5	4,5-6,0	0-1,5	1,5-3,0	3,0-4,5	4,5-6,0
41	5,679	4,186	4,675		32,929	26,772	32,112	
42	6,814	4,196	4,840		41,134	27,490	28,912	
43	5,964	4,980	6,959		33,655	30,184	41,862	
44	5,753	5,362	7,391		39,099	33,917	40,933	
45	4,739	4,685	10,923		31,394	30,579	61,463	
46	5,124	0,136	7,446		30,196	2,548	39,513	
47	4,641	5,501	4,510	7,696	33,067	34,915	26,013	37,072
48	7,567	4,335	9,667		41,932	26,359	50,275	
49	6,651	4,510	9,715		36,101	25,667	51,196	
50	0,106	0,137	0,064	0,083	3,702	3,660	1,719	0,993
51	5,315	5,153	5,822		34,224	34,576	34,293	
52	4,884	3,755	5,362		30,562	22,033	31,567	
53	3,154	2,353	2,715		19,142	12,627	14,637	
54	5,324	5,174	11,478		31,384	32,328	65,780	
55	4,298	4,603	6,629		26,357	27,595	39,704	
56	4,210	4,611	8,210		24,715	29,566	47,505	
57	6,036	5,790	18,314		39,835	30,207	90,713	
58	5,793	4,283	7,240		34,316	28,947	39,855	
59	2,803	2,872	5,772	12,114	19,282	19,851	37,128	62,741
60	4,494	3,779	5,151	9,234	28,572	24,166	35,533	54,680

Tabela B.3 - Medições de Rugosidade – Bloco 02.

Amostra Prof. (mm)	Rugosidade Ra ( $\mu\text{m}$ )									Rugosidade Rz ( $\mu\text{m}$ )								
	0-1,5	1,5-3,0	3,0-4,5	4,5-6,0	6,0-7,5	7,5-9,0	9,0-10,5	10,5-12,0	12,5-13,5	0-1,5	1,5-3,0	3,0-4,5	4,5-6,0	6,0-7,5	7,5-9,0	9,0-10,5	10,5-12,0	12,5-13,5
21	4,350	3,488	3,774	3,974	4,039	4,189	5,085	6,315	6,149	28,114	24,467	23,247	23,966	24,104	27,452	28,764	34,299	36,122
22	2,961	3,124	3,581	3,676	4,195	5,764	6,165	10,627	17,734	19,311	17,602	22,386	23,448	24,221	32,140	34,873	56,386	100,292
23	4,141	7,401	6,842	10,450	13,797	30,840				25,720	43,246	39,942	54,662	71,692	113,407			
24	5,018	5,359	7,754	9,007	13,037	16,575	28,693	29,525		30,091	32,040	44,102	48,276	62,290	75,739	138,528	157,247	
25	3,110	2,702	2,285	2,499	2,780	2,804	2,958	3,229		22,134	17,834	15,929	17,297	17,294	18,190	18,998	21,751	
26	3,898	3,678	4,604	5,045	5,264	6,742	9,897	18,707		25,251	23,642	28,732	29,523	29,864	34,662	53,811	84,363	
27	4,404	4,289	4,738	5,032	4,900	5,334	6,668	6,851		28,036	28,041	25,036	29,075	26,230	29,533	35,859	40,617	
28	5,766	5,401	5,886	6,218	7,236	9,487	14,425	23,727		36,635	33,432	32,745	34,719	42,443	54,106	80,122	132,400	
29	2,595	2,862	3,993	7,351	10,270					16,834	18,805	21,988	43,662	50,774				
30	4,435	4,241	5,470	6,321	7,214	8,513	8,068	13,559		26,875	26,228	30,303	32,362	35,558	38,085	38,498	64,370	
31	3,652	4,989	5,840	5,230	6,890	8,140	9,497			20,238	24,925	29,944	25,444	36,393	36,741	42,446		
32	3,938	3,439	5,482	6,712	8,343	8,271	14,226	18,309		23,677	21,627	29,262	34,354	42,356	41,976	70,297	84,556	
33	4,131	4,980	6,352	6,312	7,170	8,249	11,494	10,229	14,351	24,252	27,353	32,840	33,483	38,932	40,081	57,343	58,698	73,248
34	4,567	4,844	4,947	5,186	5,495	6,107	9,266	12,309	19,150	26,335	28,843	29,834	29,621	34,594	32,624	43,067	56,151	84,192
35	2,635	3,221	3,709	5,859	6,381	4,989	20,065			17,622	18,363	20,065	30,617	34,002	25,975	103,739		
36	4,438	4,276	4,698	5,251	6,947	8,086	12,177	14,150		29,527	27,894	25,455	27,498	33,582	38,709	59,985	64,256	
37	6,725	8,728	14,079	21,994						38,079	40,197	56,480	98,029					
38	5,461	6,841	9,844	11,320	16,161					32,553	36,520	51,977	63,970	75,389				
39	5,101	5,053	13,374	10,450	18,604	31,552				29,785	29,372	76,287	48,458	76,952	162,135			
40	2,766	3,181	3,690	5,552	5,845	8,151	13,513	6,138		18,127	19,101	22,742	26,422	32,540	40,028	55,305	26,369	

Tabela B.4 - Medições de Rugosidade – Bloco 04.

Amostra	Rugosidade Ra ( $\mu\text{m}$ )									Rugosidade Rz ( $\mu\text{m}$ )									
	Prof. (mm)	0-1,5	1,5-3,0	3,0-4,5	4,5-6,0	6,0-7,5	7,5-9,0	9,0-10,5	10,5-12,0	12,5-13,5	0-1,5	1,5-3,0	3,0-4,5	4,5-6,0	6,0-7,5	7,5-9,0	9,0-10,5	10,5-12,0	12,5-13,5
61		4,204	3,735	3,761	3,803	4,031	4,079	5,393	7,835		28,494	25,638	23,892	22,993	23,469	24,796	30,904	37,107	
62		3,489	3,315	3,728	3,972	4,405	4,972	5,944	8,657		24,756	21,004	22,866	25,927	25,186	27,587	31,522	49,631	
63		3,487	3,238	3,640	3,978	4,306	4,842	5,893	7,185		20,877	20,829	22,918	25,971	26,472	25,790	32,137	35,962	
64		6,965	5,034	5,300	6,246	9,651	12,837	15,054	19,042		43,932	32,473	32,358	34,267	55,079	66,438	74,672	86,735	
65		3,651	4,018	3,935	4,357	4,610	4,774	6,276	7,626		24,991	23,293	25,179	25,365	26,149	25,781	34,92	40,449	
66		4,267	3,381	3,701	3,877	4,011	4,973	5,873	11,261		29,675	20,932	24,141	23,669	25,071	27,487	35,584	56,092	
67		6,443	4,836	4,228	4,631	4,518	4,679	5,719	5,08		38,979	30,293	27,826	27,537	25,572	27,579	32,144	29,306	
68		5,537	4,322	4,729	4,699	5,49	6,106	7,183	8,486		36,363	28,119	26,781	29,236	31,081	34,249	37,407	44,514	
69		3,937	3,916	3,604	3,642	3,843	4,842	5,156	6,008		25,846	24,166	22,760	20,478	20,292	25,579	27,564	30,469	
70		4,883	3,872	4,159	4,504	4,857	6,339	7,233	7,672		28,204	24,091	24,820	27,082	25,858	33,404	39,940	39,695	
71		4,566	3,889	4,545	5,46	7,625	9,655	12,012	18,774		29,558	25,375	27,767	30,937	43,456	47,105	58,928	88,846	
72		2,904	2,948	3,455	3,444	3,642	4,361	4,777	4,51		18,812	23,316	24,106	20,305	20,815	28,043	24,626	24,983	
73		4,552	3,721	4,261	5,044	6,387	8,793	10,293	12,306		28,600	25,428	25,511	27,658	41,945	50,611	52,023	51,029	
74		3,331	3,657	3,918	4,164	4,126	4,641	6,554	8,993		24,276	22,384	25,606	26,868	25,722	28,96	32,578	43,967	
75		5,871	3,892	3,622	4,005	4,711	4,201	4,516	4,601		35,514	24,502	23,812	25,091	28,296	26,716	25,825	25,838	
76		2,810	2,887	4,029	4,403	4,367	5,034	6,015	7,686	9,083	17,830	18,880	23,333	25,91	26,587	27,748	33,687	42,728	53,004
77		4,553	4,098	4,935	5,157	5,074	5,499	5,752	7,746		24,833	28,422	26,677	29,100	28,251	31,539	33,531	43,471	
78		4,225	4,757	4,460	3,760	4,995	5,368	5,869	8,142	8,360	26,667	27,212	29,037	25,853	29,429	29,139	33,297	43,382	44,509
79		4,47	3,894	4,967	4,644	5,023	4,695	5,072	5,828		27,191	23,177	30,243	25,184	26,768	24,87	28,822	33,420	
80		3,493	2,585	2,757	3,092	2,613	3,015	2,453	2,586	2,486	21,241	18,290	18,756	18,830	16,838	18,852	14,494	16,915	16,661

APÊNDICE C – Medições de zona suavizada

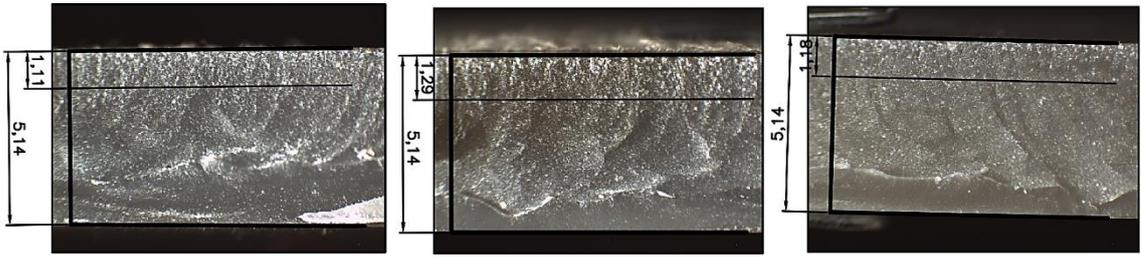


Figura C.1 - Amostra 01.

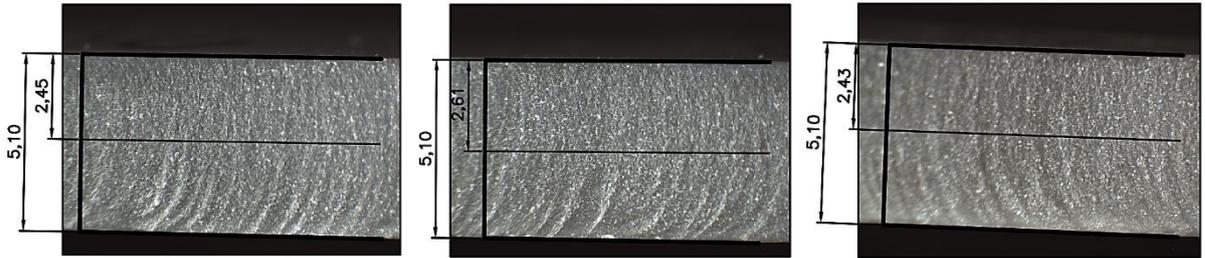


Figura C.2 - Amostra 02.



Figura C.3 - Amostra 03.



Figura C.4 - Amostra 04.

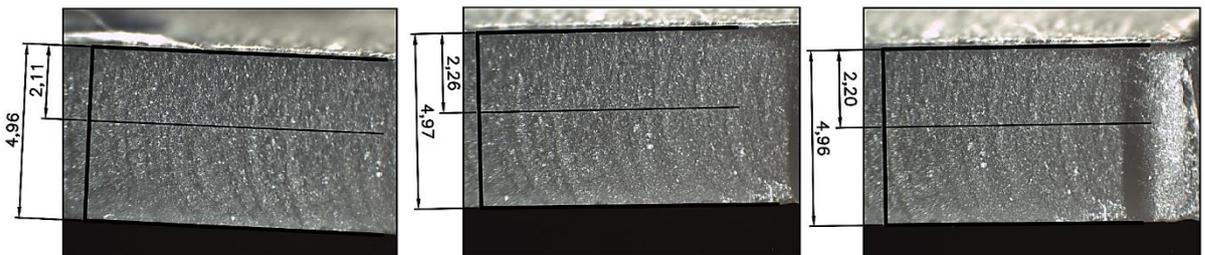


Figura C.5 - Amostra 05.

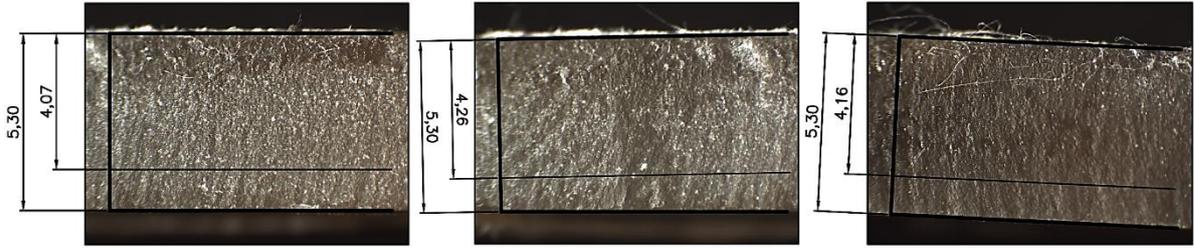


Figura C.6 - Amostra 06.

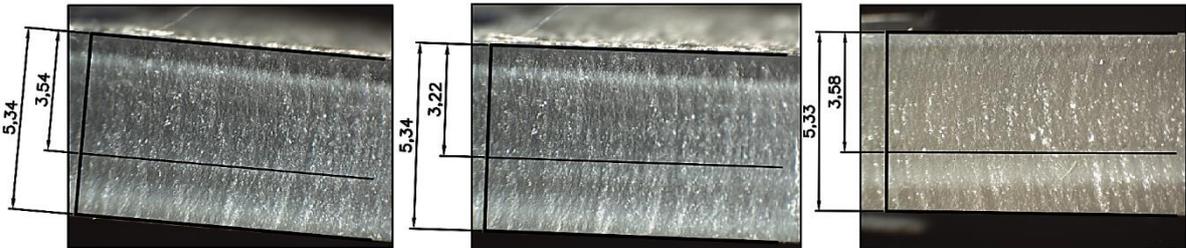


Figura C.7 - Amostra 07.



Figura C.8 - Amostra 08.



Figura C.9 - Amostra 09.

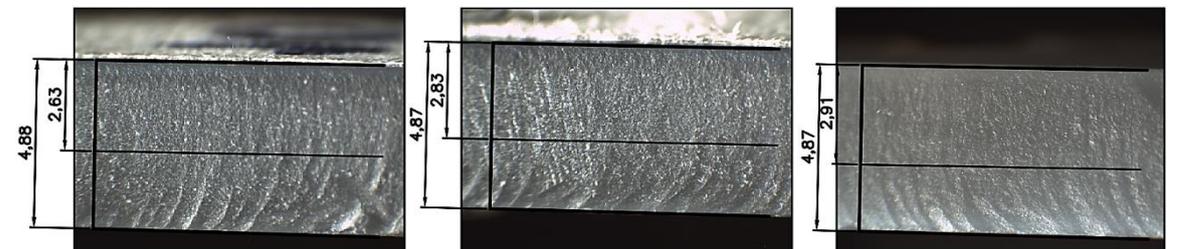


Figura C.10 - Amostra 10.

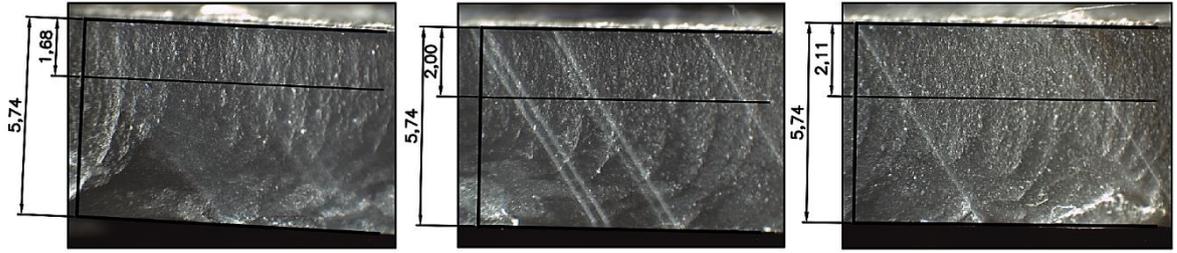


Figura C.11 - Amostra 11.

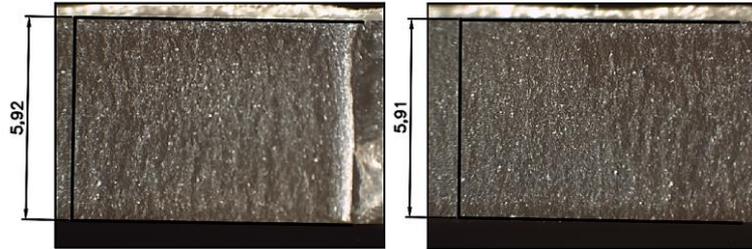


Figura C.12 - Amostra 12.

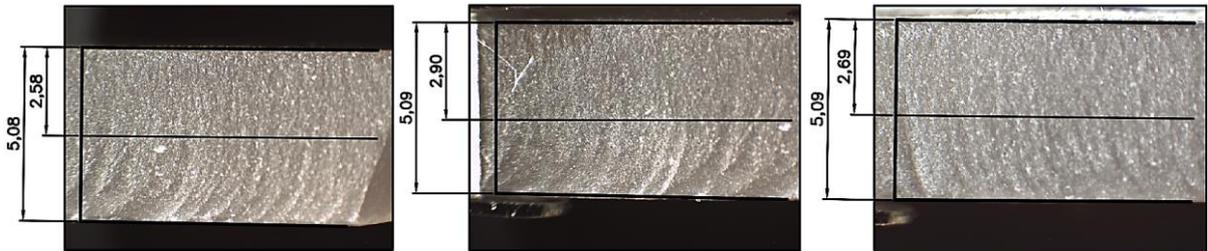


Figura C.13 - Amostra 13.



Figura C.14 - Amostra 14.

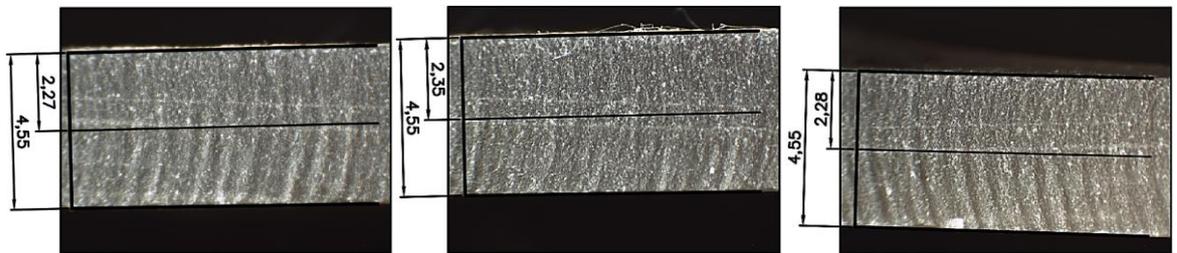


Figura C.15 - Amostra 15.

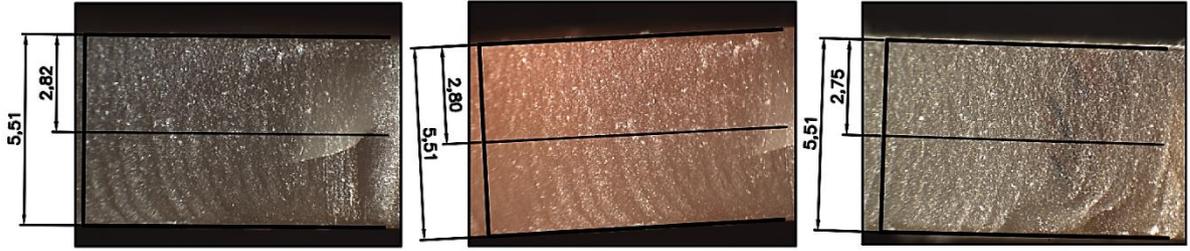


Figura C.16 - Amostra 16.



Figura C.17 - Amostra 17.

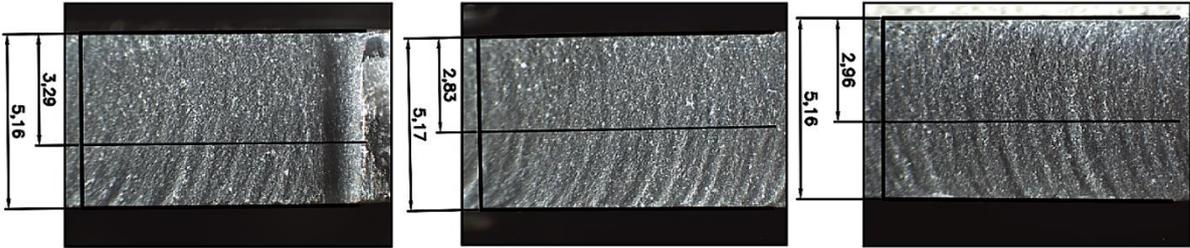


Figura C.18 - Amostra 18.

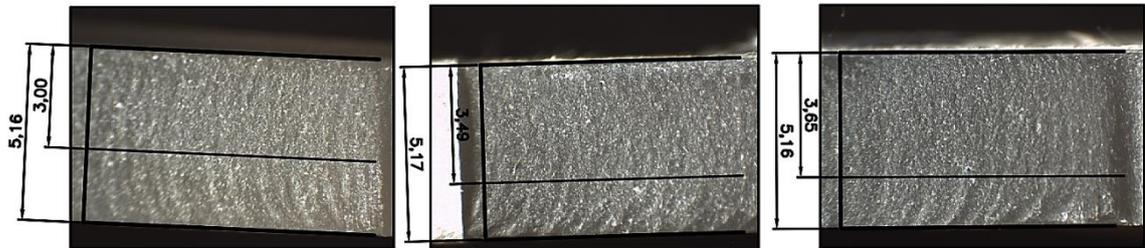


Figura C.19 - Amostra 19.

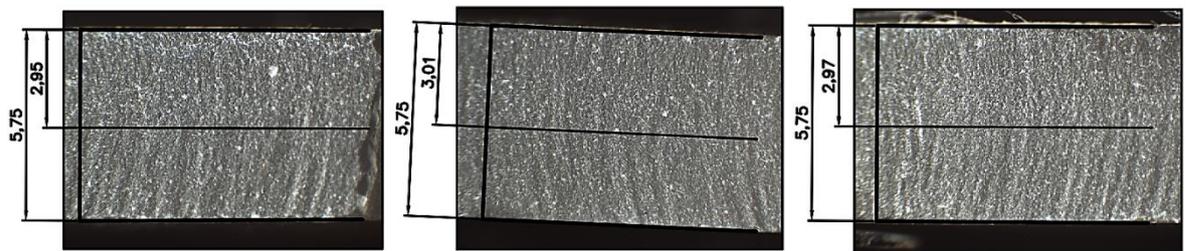


Figura C.20 - Amostra 20.

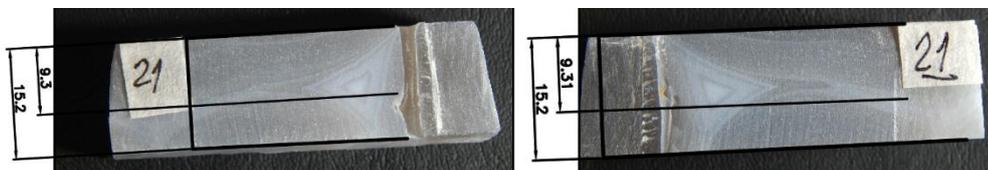


Figura C.21 - Amostra 21.

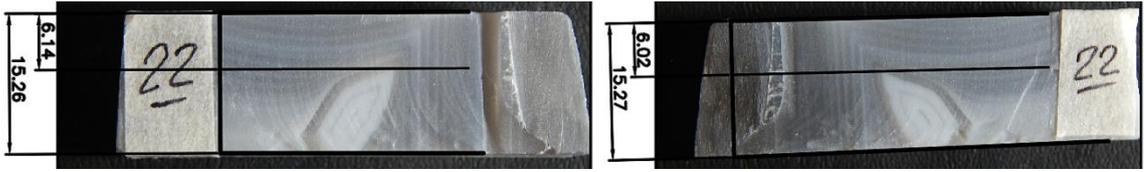


Figura C.22 - Amostra 22.

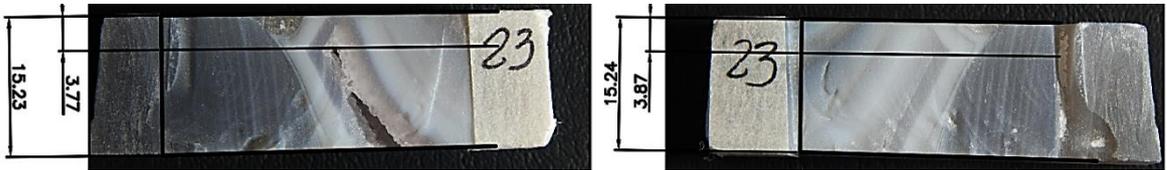


Figura C.23 - Amostra 23.

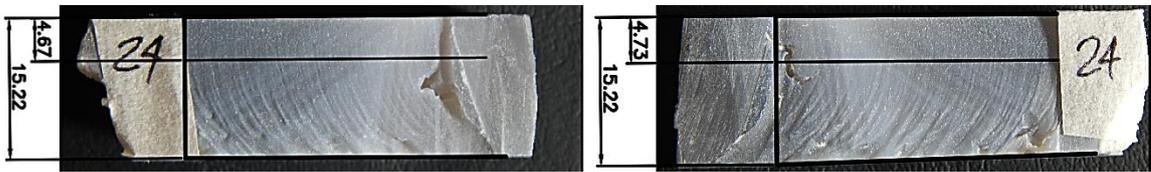


Figura C.24 - Amostra 24.

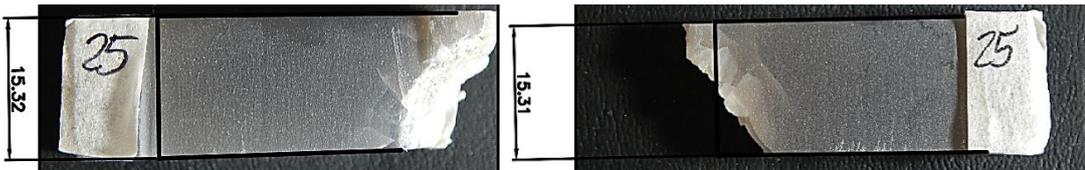


Figura C.25 - Amostra 25.

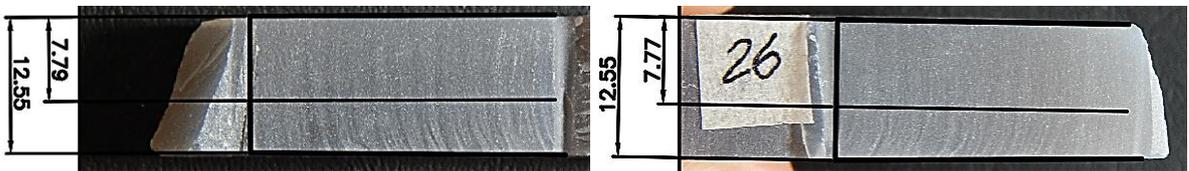


Figura C.26 - Amostra 26.

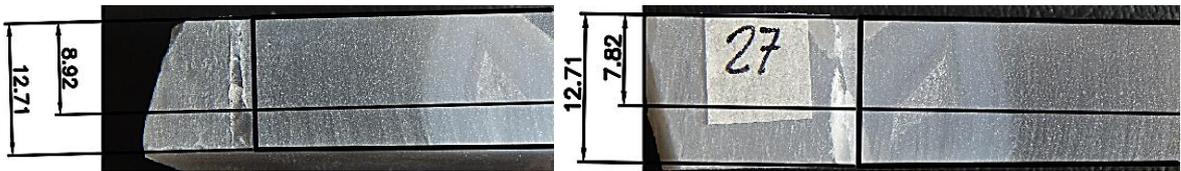


Figura C.27 - Amostra 27.

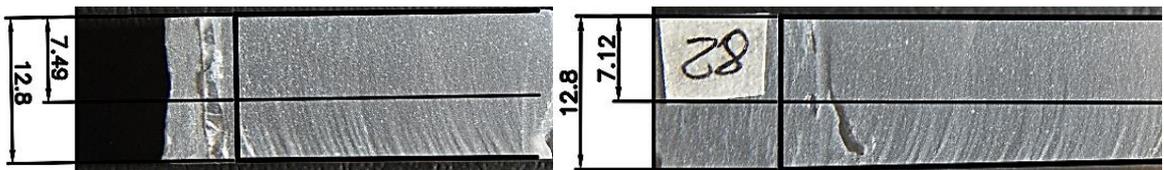


Figura C.28 - Amostra 28.

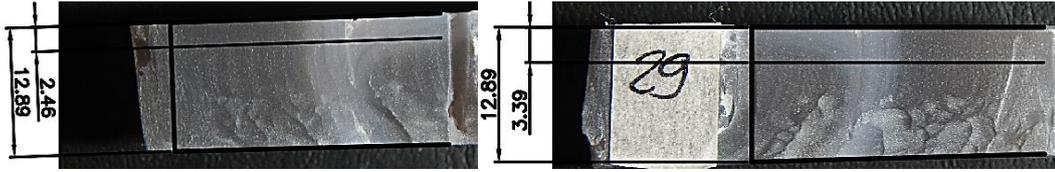


Figura C.29 - Amostra 29.

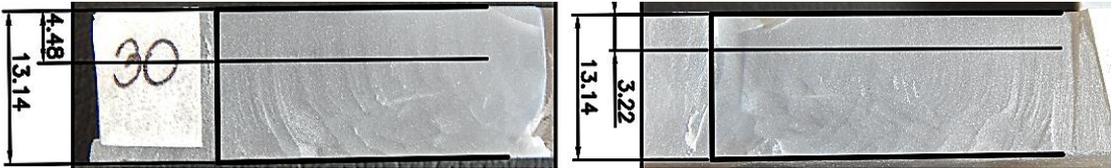


Figura C.30 - Amostra 30.

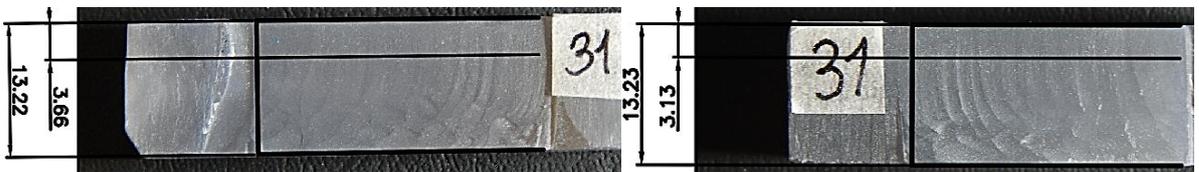


Figura C.31 - Amostra 31.

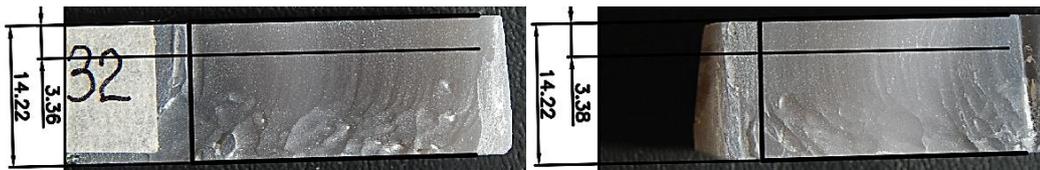


Figura C.32 - Amostra 32.

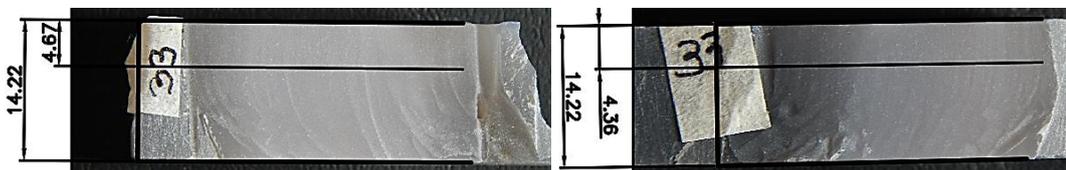


Figura C.33 - Amostra 33.

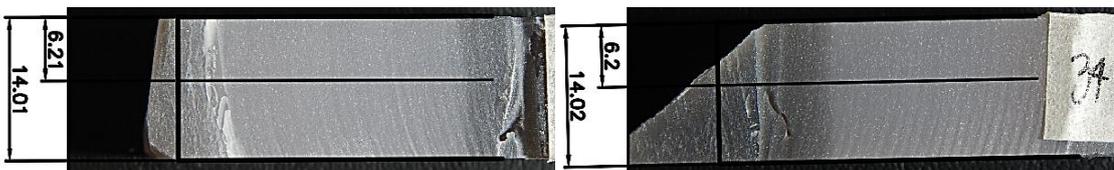


Figura C.34 - Amostra 34.

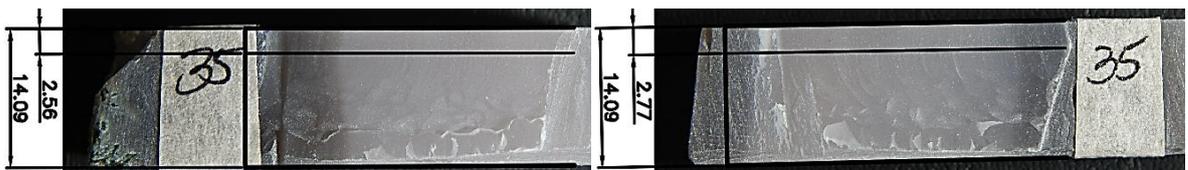


Figura C.35 - Amostra 35.

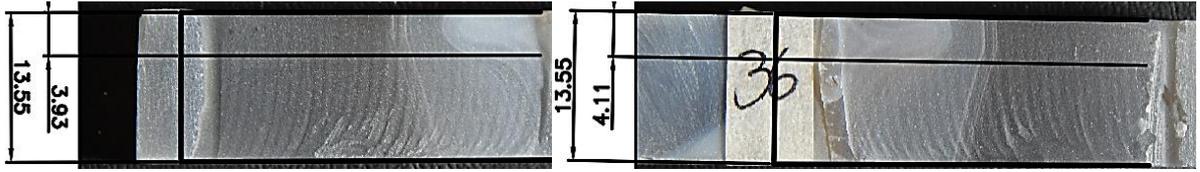


Figura C.36 - Amostra 36.

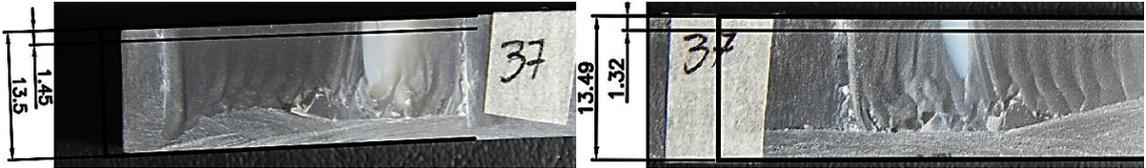


Figura C.37 - Amostra 37.

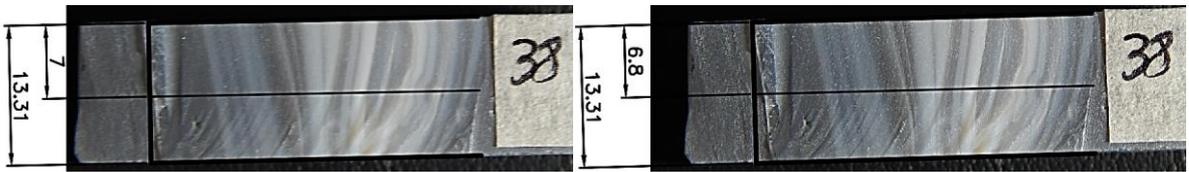


Figura C.38 - Amostra 38.

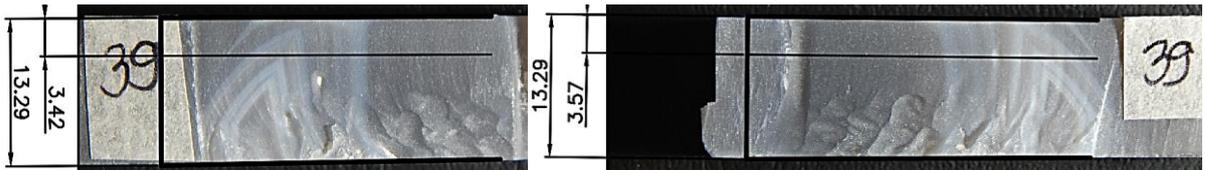


Figura C.39 - Amostra 39.

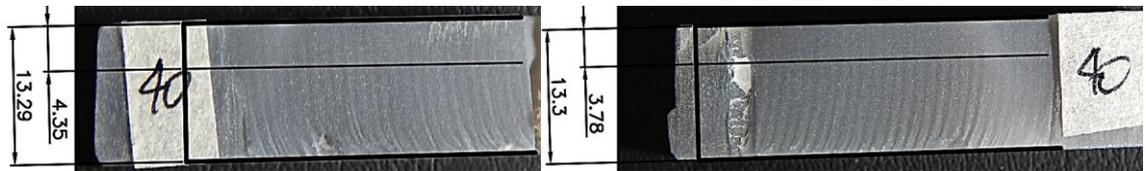


Figura C.40 - Amostra 40.



Figura C.41 - Amostra 41.



Figura C.42 - Amostra 42.



Figura C.43 - Amostra 43.

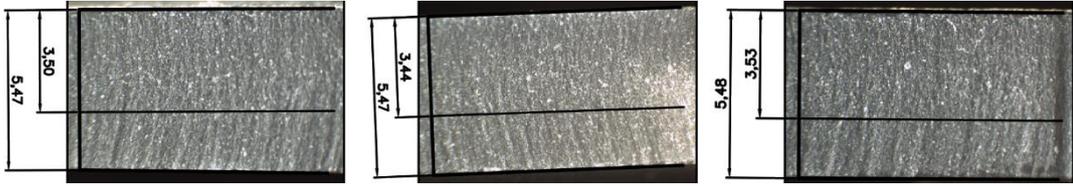


Figura C.44 - Amostra 44.

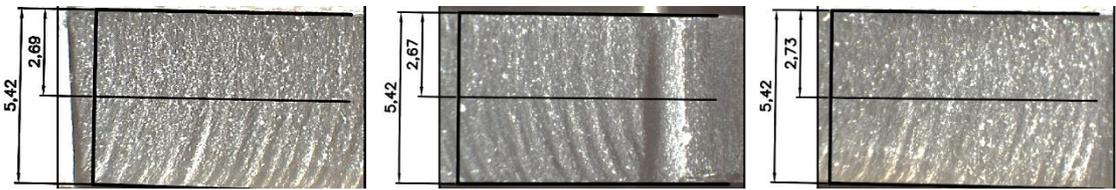


Figura C.45 - Amostra 45.



Figura C.46 - Amostra 46.



Figura C.47 - Amostra 47.



Figura C.48 - Amostra 48.



Figura C.49 - Amostra 49.



Figura C.50 - Amostra 50.

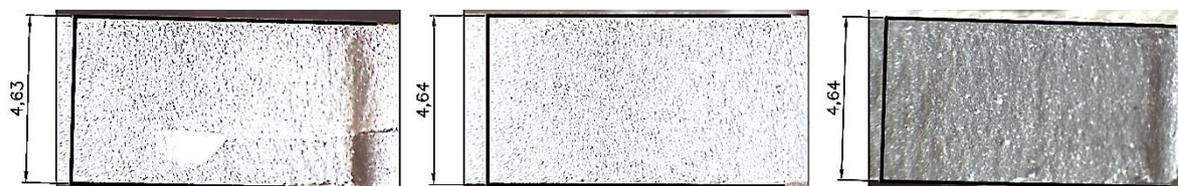


Figura C.51 - Amostra 51.



Figura C.52 - Amostra 52.



Figura C.53 - Amostra 53.



Figura C.54 - Amostra 54.



Figura C.55 - Amostra 55.



Figura C.56 - Amostra 56.

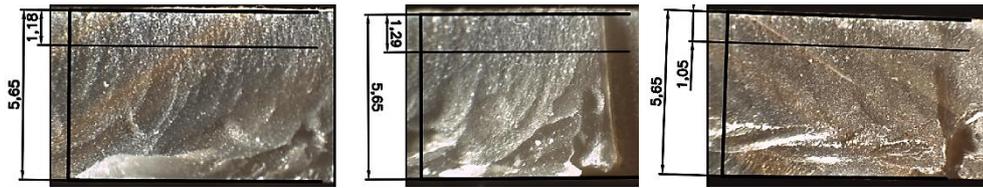


Figura C.57 - Amostra 57.



Figura C.58 - Amostra 58.



Figura C.59 - Amostra 59.



Figura C.60 - Amostra 60.

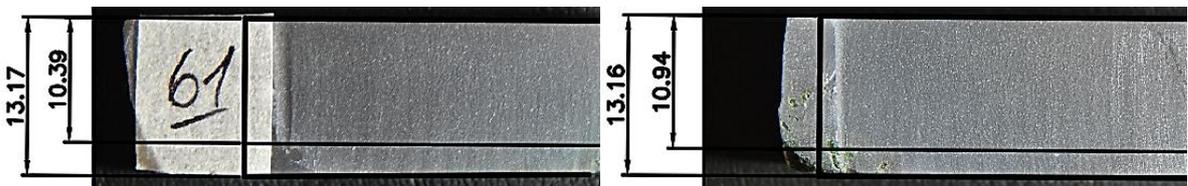


Figura C.61 - Amostra 61.

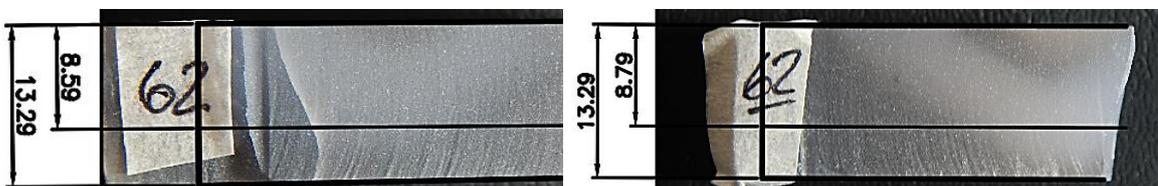


Figura C.62 - Amostra 62.

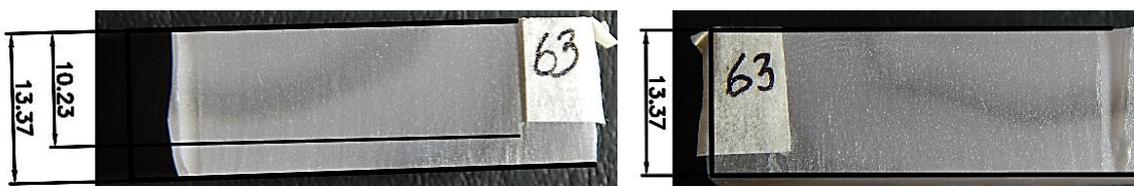


Figura C.63 - Amostra 63.

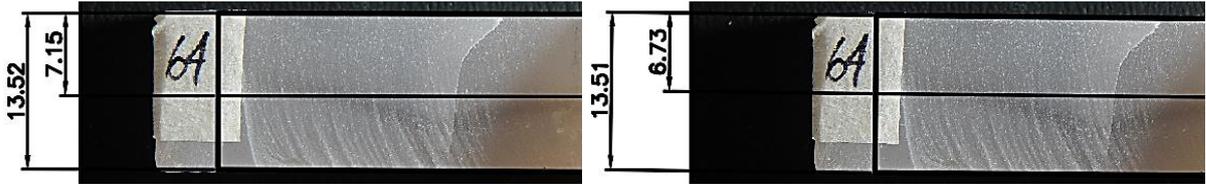


Figura C.64 - Amostra 64.

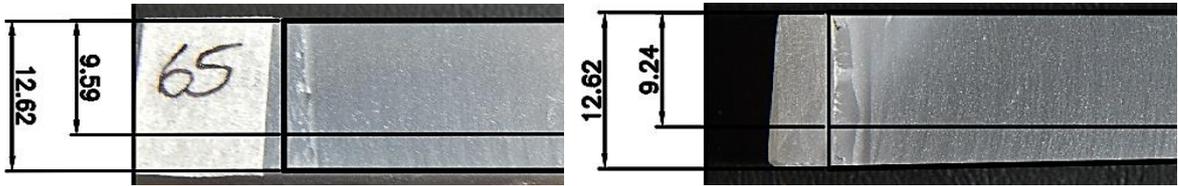


Figura C.65 - Amostra 65.

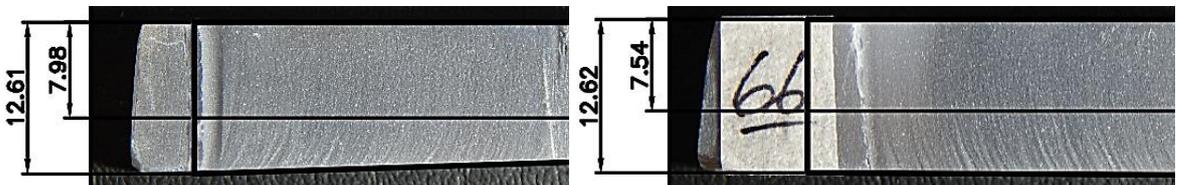


Figura C.66 - Amostra 66.

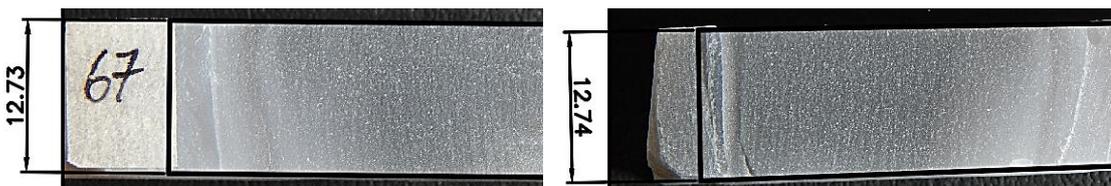


Figura C.67 - Amostra 67.

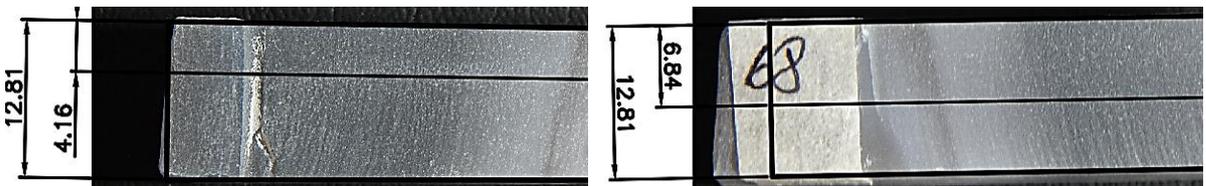


Figura C.68 - Amostra 68.

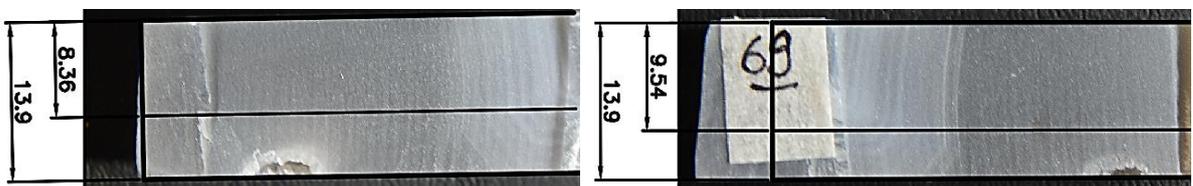


Figura C.69 - Amostra 69.

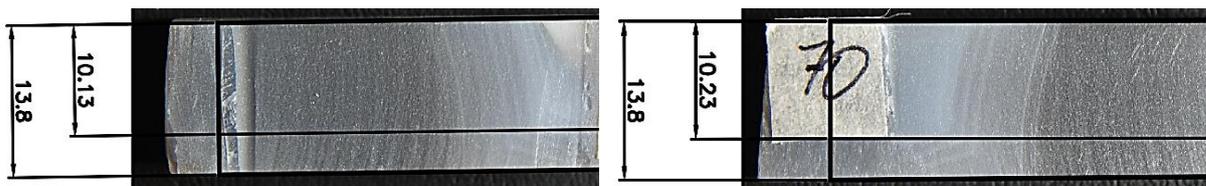


Figura C.70 - Amostra 70.

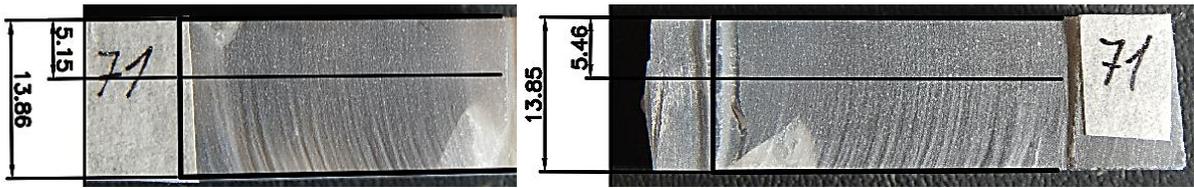


Figura C.71 - Amostra 71.

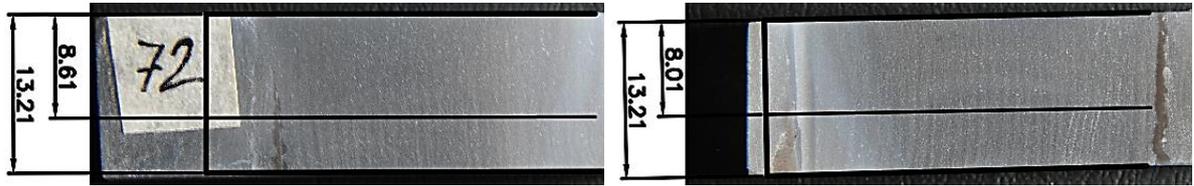


Figura C.72 - Amostra 72.

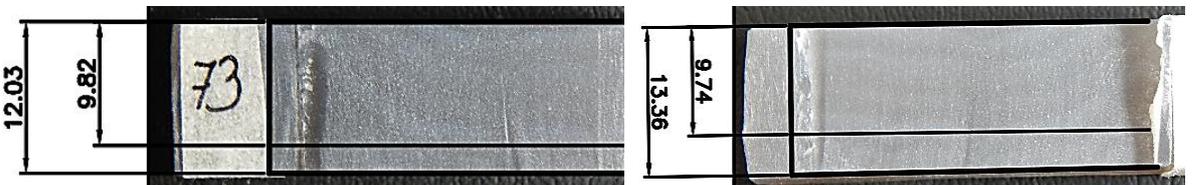


Figura C.73 - Amostra 73.

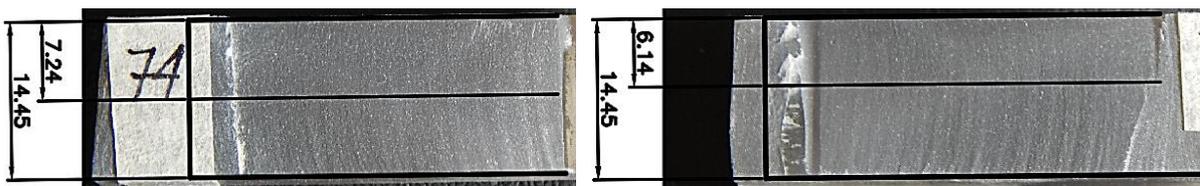


Figura C.74 - Amostra 74.

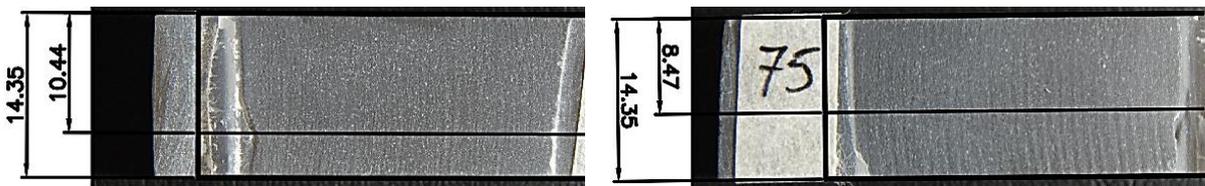


Figura C.75 - Amostra 75.

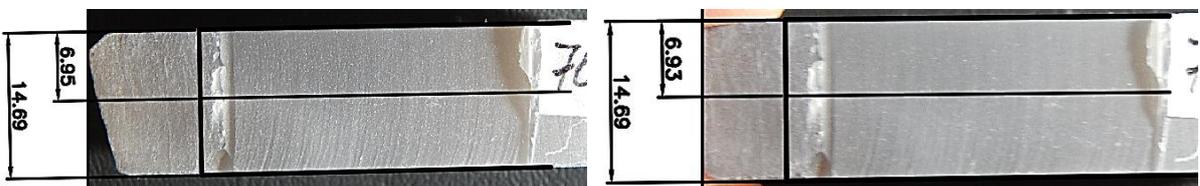


Figura C.76 - Amostra 76.

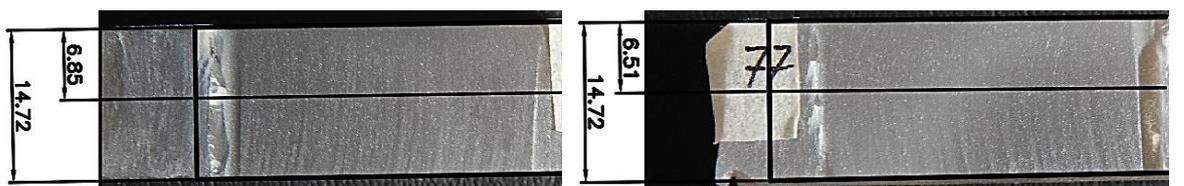


Figura C.77 - Amostra 77.

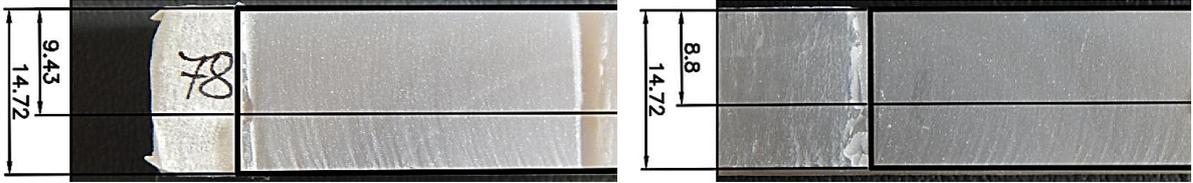


Figura C.78 - Amostra 78.

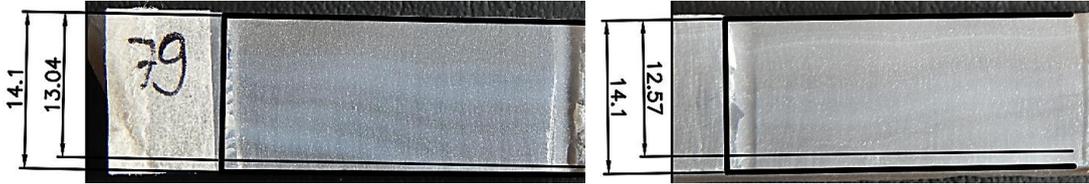


Figura C.79 - Amostra 79.

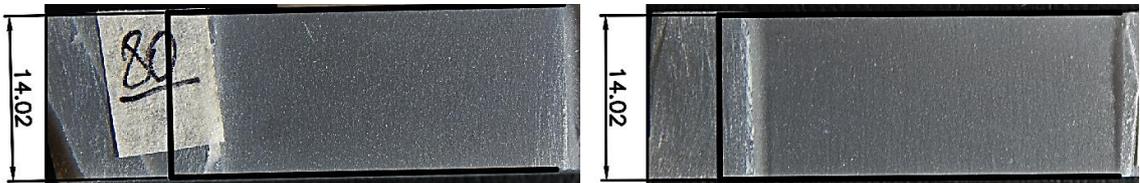


Figura C.80 - Amostra 80.

**APÊNDICD D** – Imagens de medição da largura de fenda ( $k_w$ ) e desvio de perpendicularidade ( $u$ ).

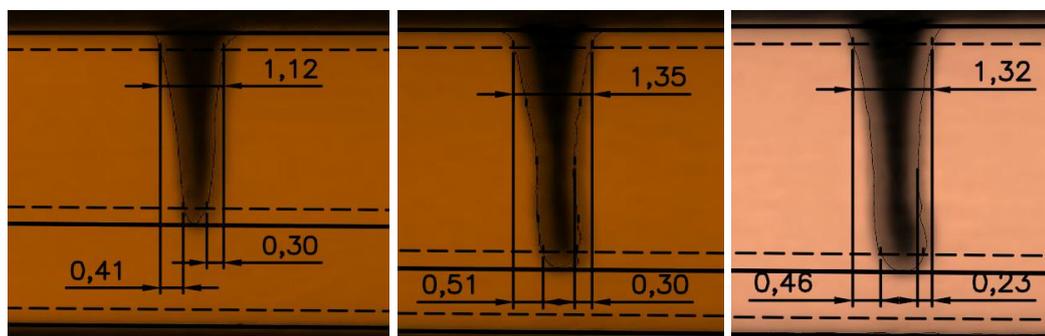


Figura D.1 - Amostra 01.

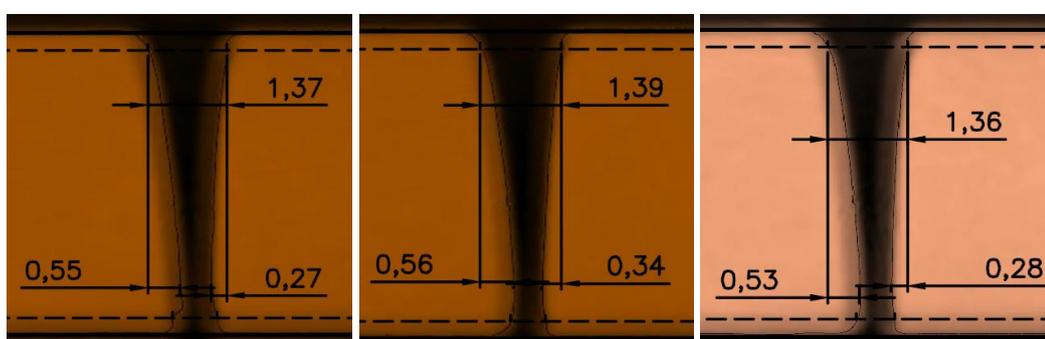


Figura D.2 - Amostra 02.

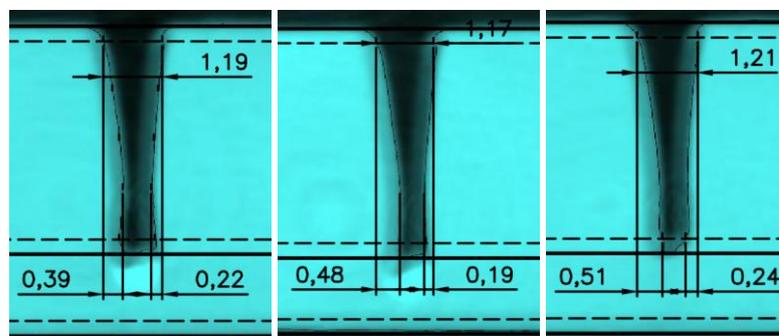


Figura D.3 - Amostra 03.

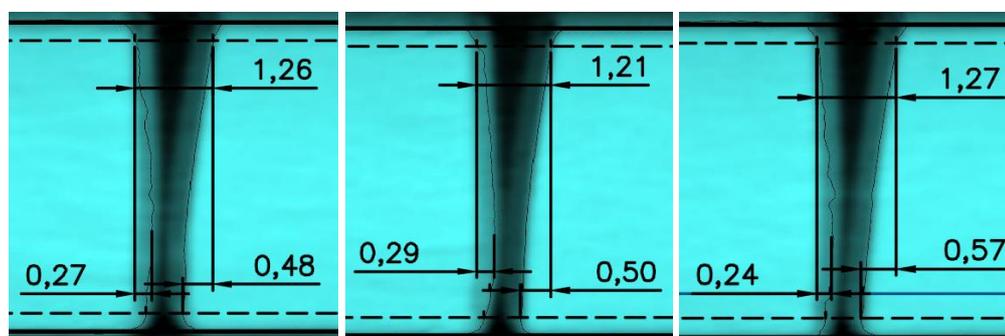


Figura D.4 - Amostra 04.

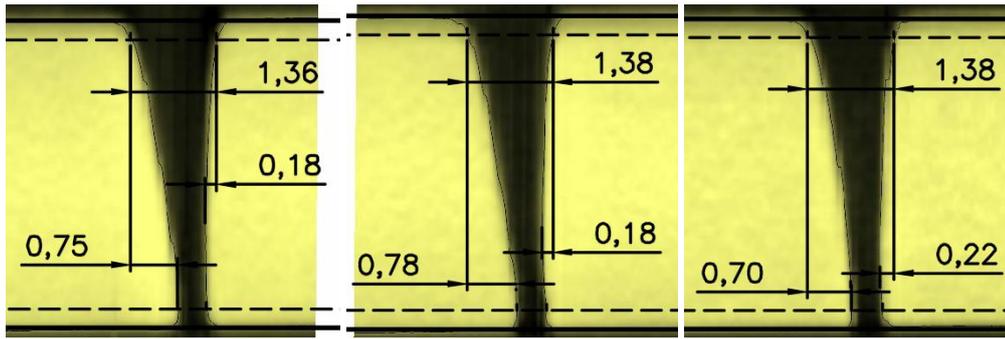


Figura D.5 - Amostra 05.

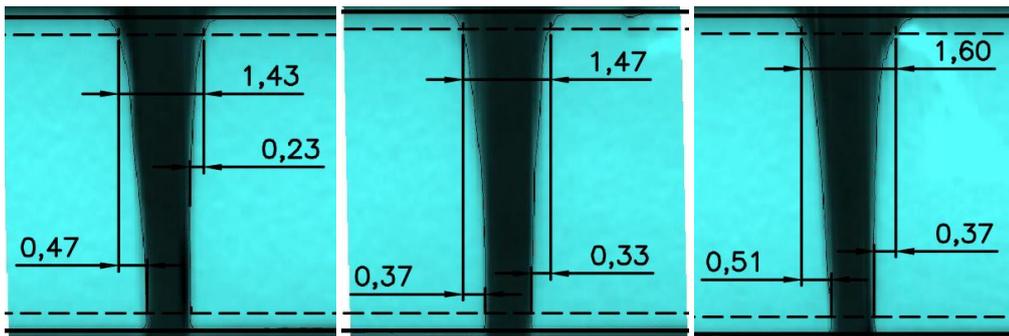


Figura D.6 - Amostra 06.

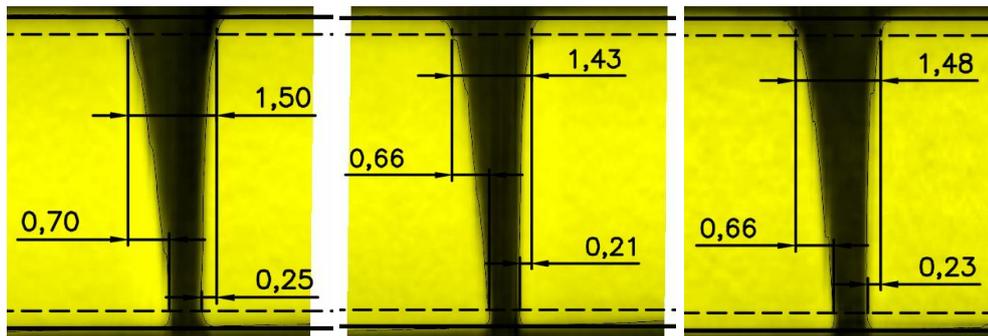


Figura D.7 - Amostra 07.

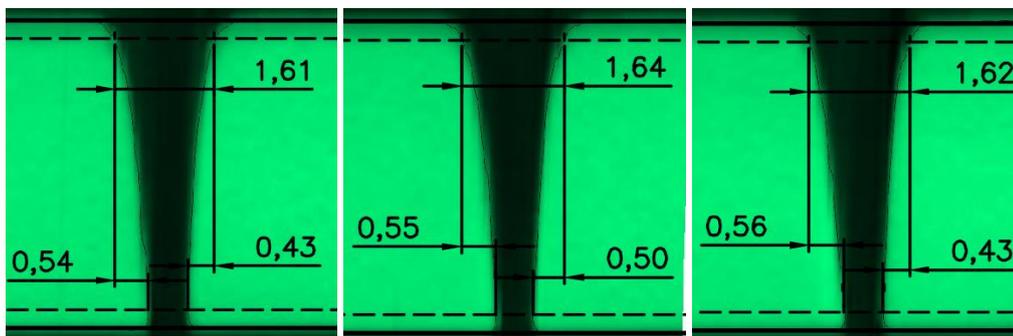


Figura D.8 - Amostra 08.

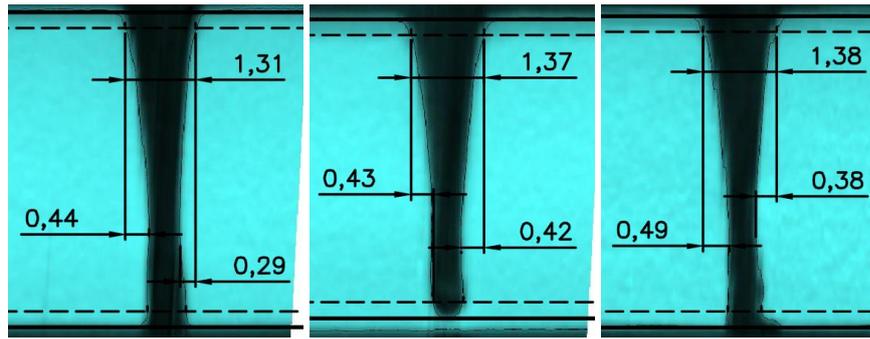


Figura D.9 - Amostra 09.

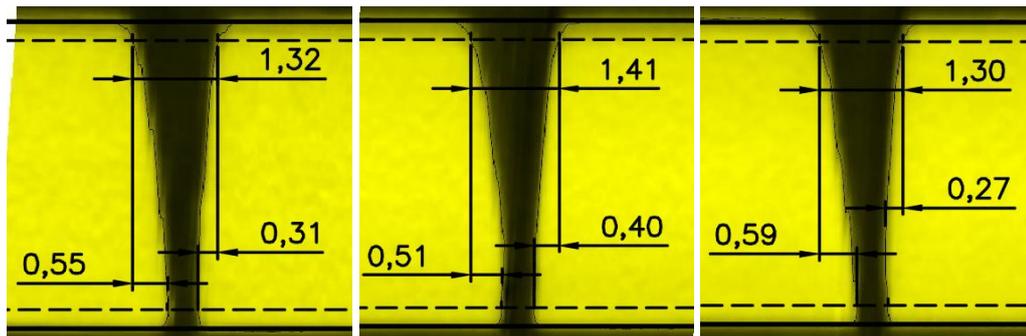


Figura D.10 - Amostra 10.

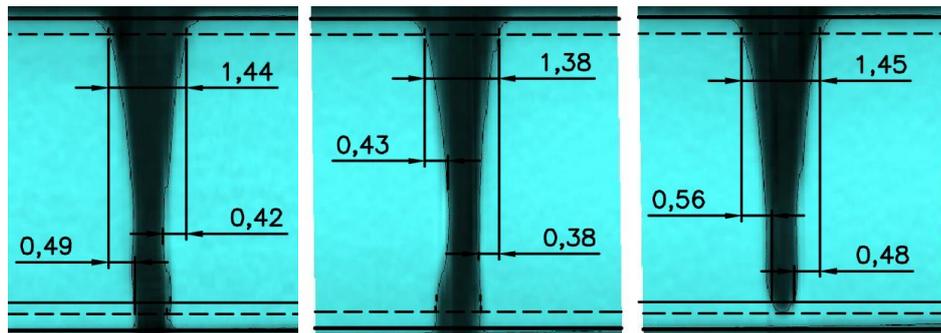


Figura D.11 - Amostra 11.

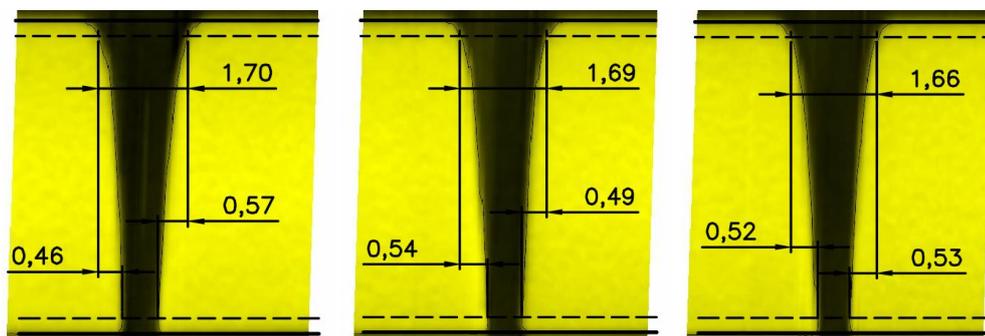


Figura D.12 - Amostra 12.

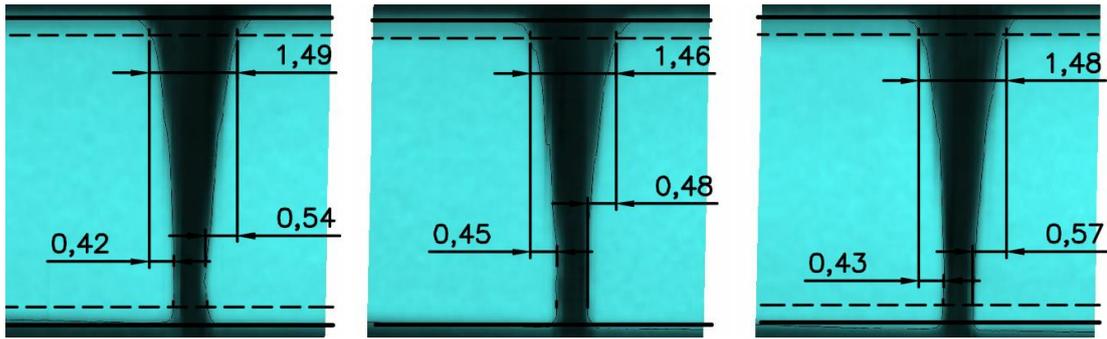


Figura D.13 - Amostra 13.

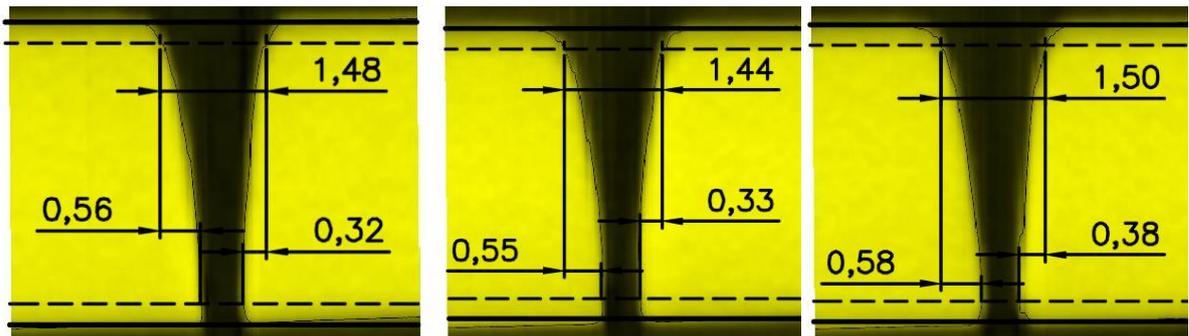


Figura D.14 - Amostra 14.

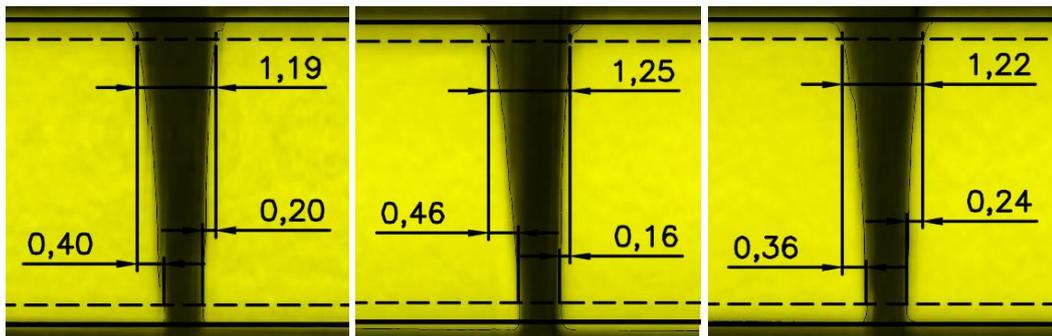


Figura D.15 - Amostra 15.

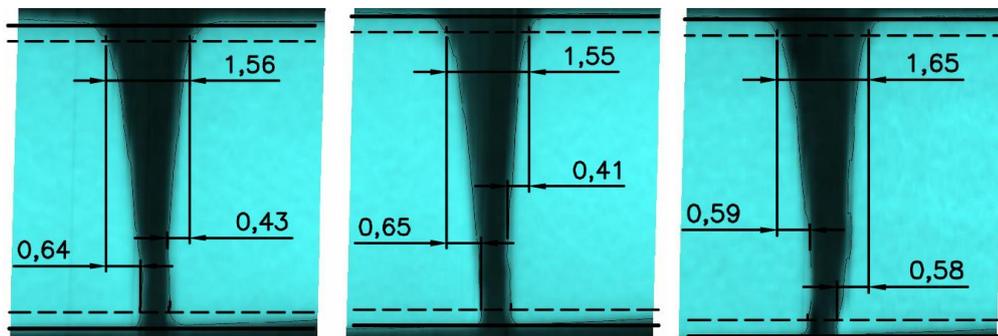


Figura D.16 - Amostra 16.

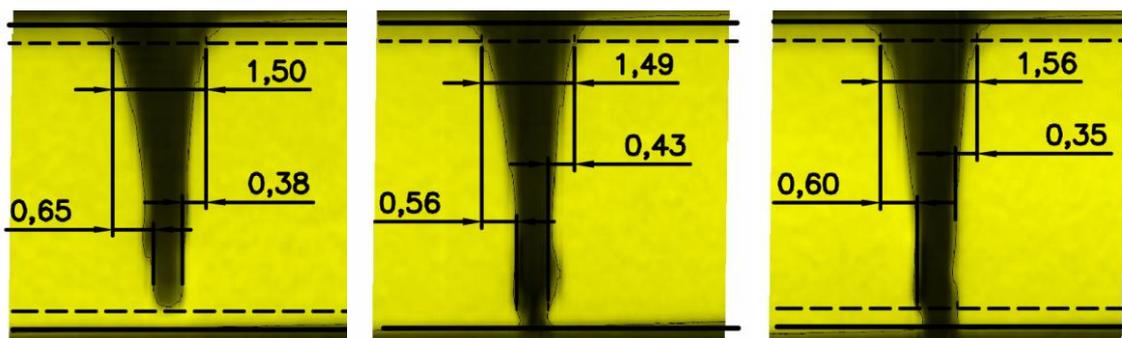


Figura D.17 - Amostra 17.

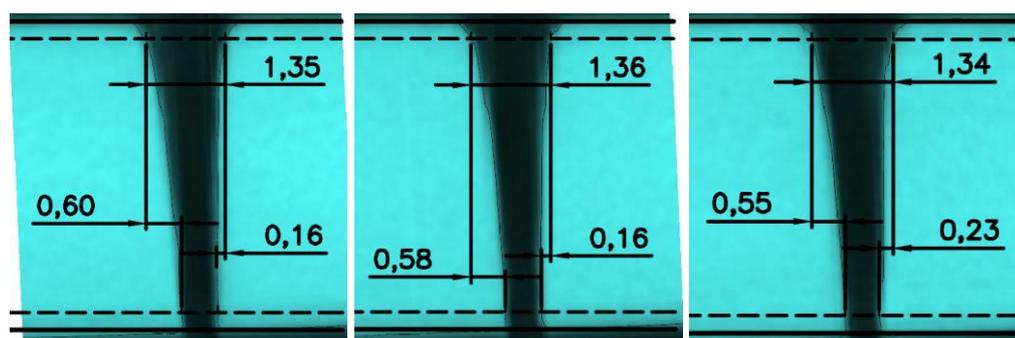


Figura D.18 - Amostra 18.

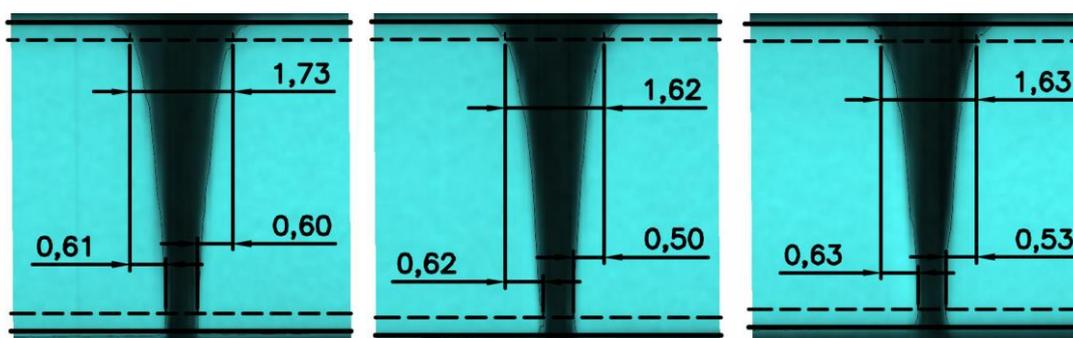


Figura D.19 - Amostra 19.

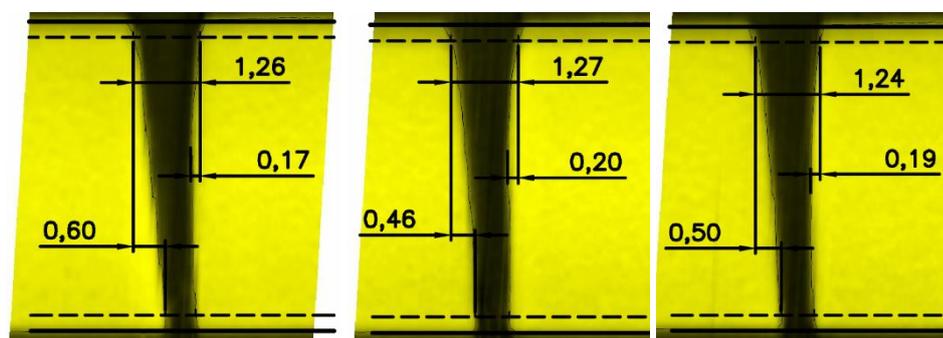


Figura D.20 - Amostra 20.

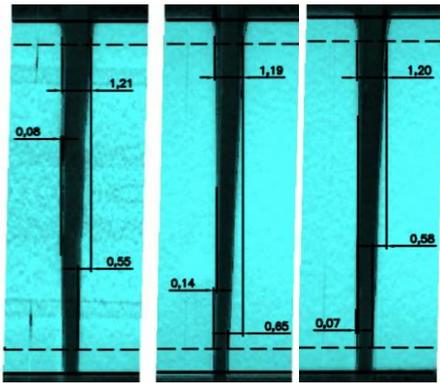


Figura D.21 - Amostra 21.

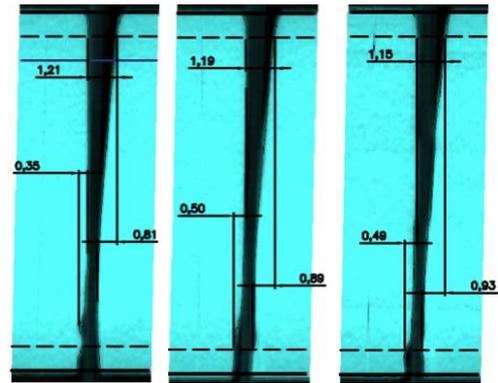


Figura D.22 - Amostra 22.

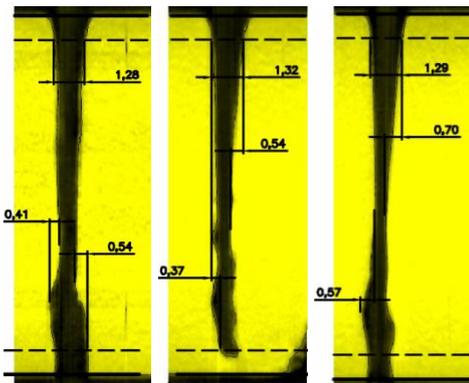


Figura D.23 - Amostra 23.

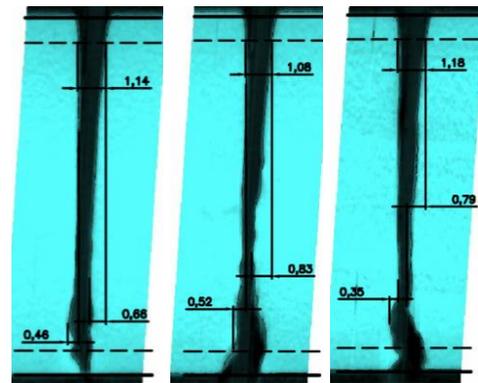


Figura D.24 - Amostra 24.

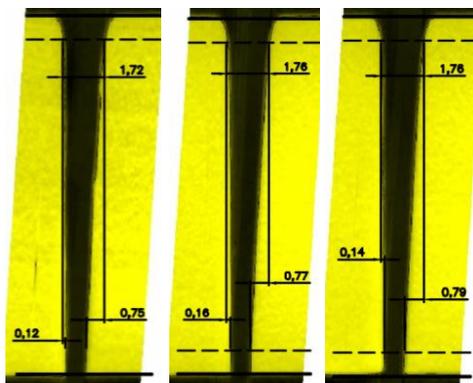


Figura D.25 - Amostra 25.

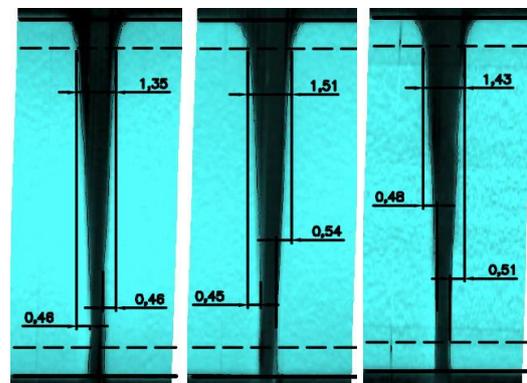


Figura D.26 - Amostra 26.

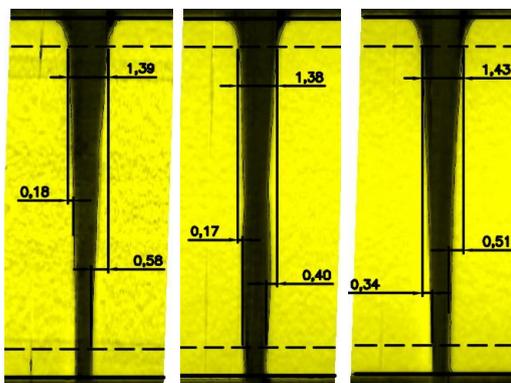


Figura D.27 - Amostra 27.

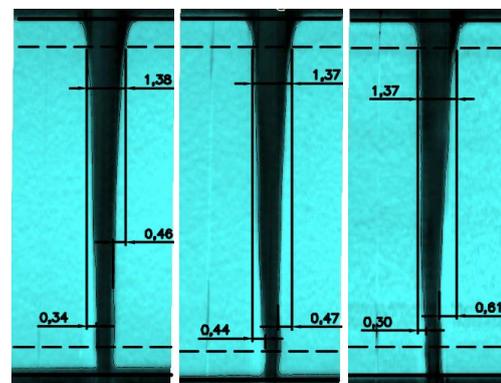


Figura D.28 - Amostra 28.

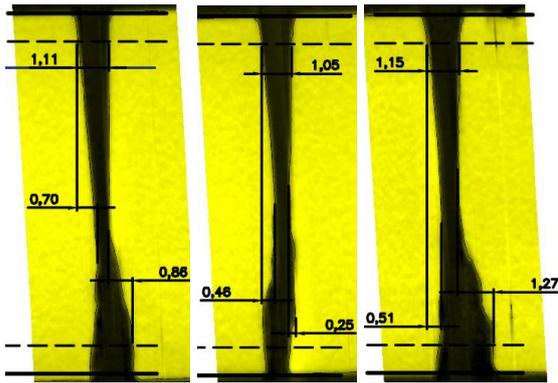


Figura D.29 - Amostra 29.

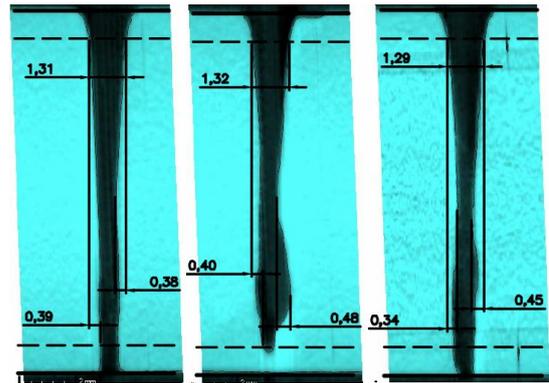


Figura D.30 - Amostra 30.

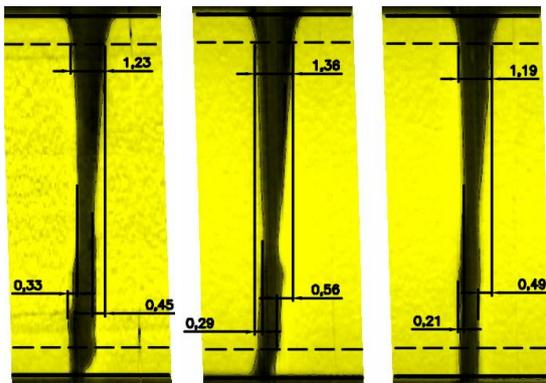


Figura D.31 - Amostra 31.

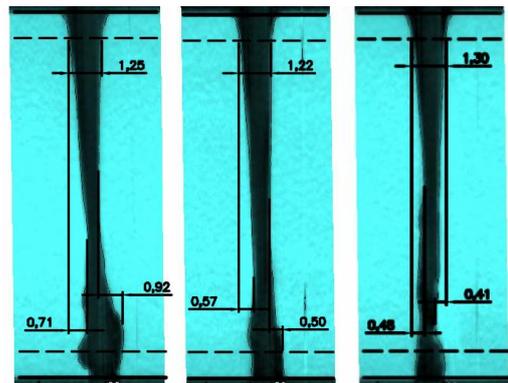


Figura D.32 - Amostra 32.

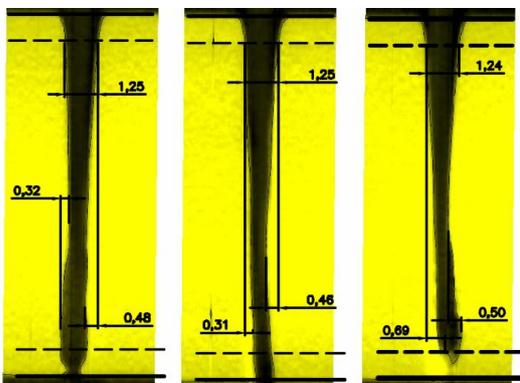


Figura D.33 - Amostra 33.

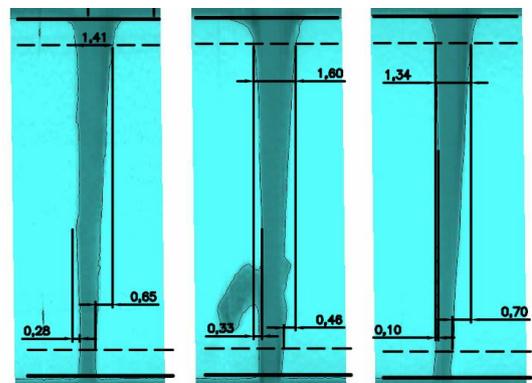


Figura D.34 - Amostra 34.

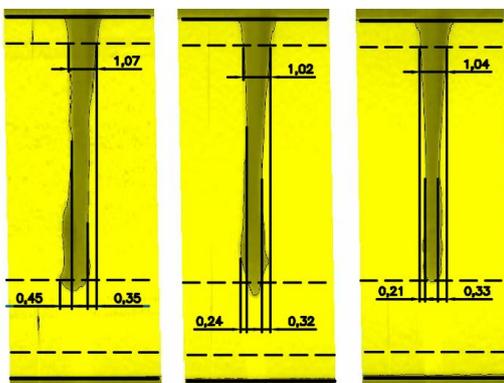


Figura D.35 - Amostra 35.

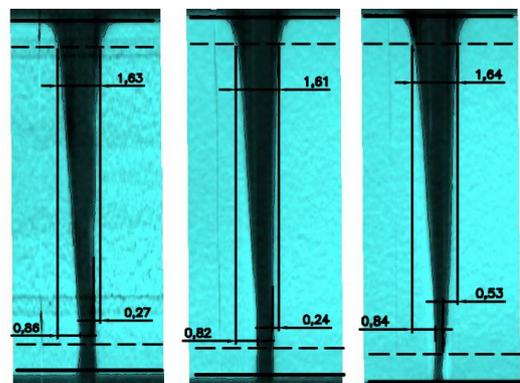


Figura D.36 - Linha 36.

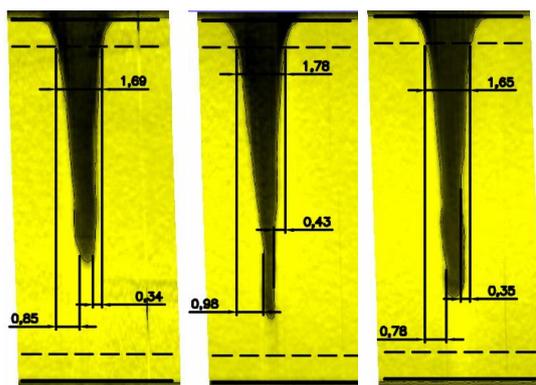


Figura D.37 - Linha 37.

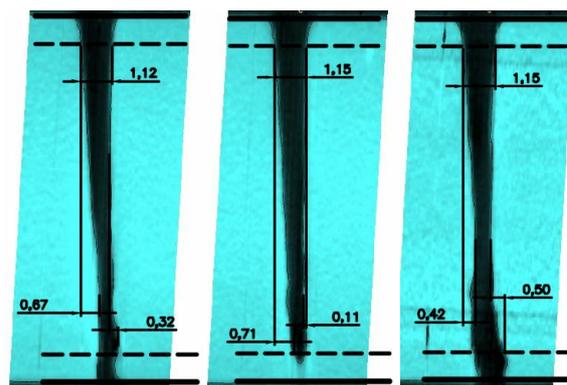


Figura D.38 - Linha 38.

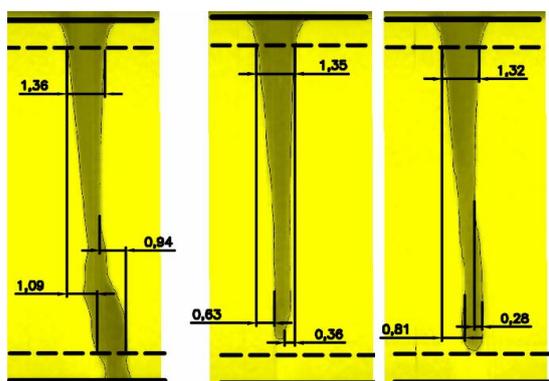


Figura D.39 - Amostra 39.

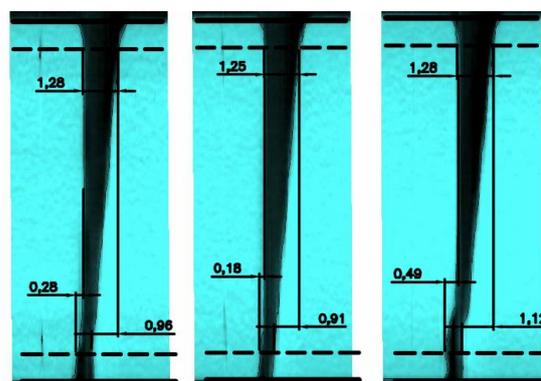


Figura D.40 - Amostra 40.

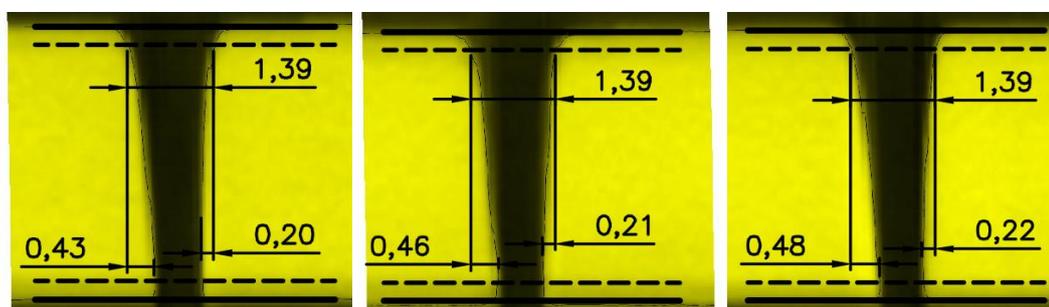


Figura D.41 - Amostra 41.

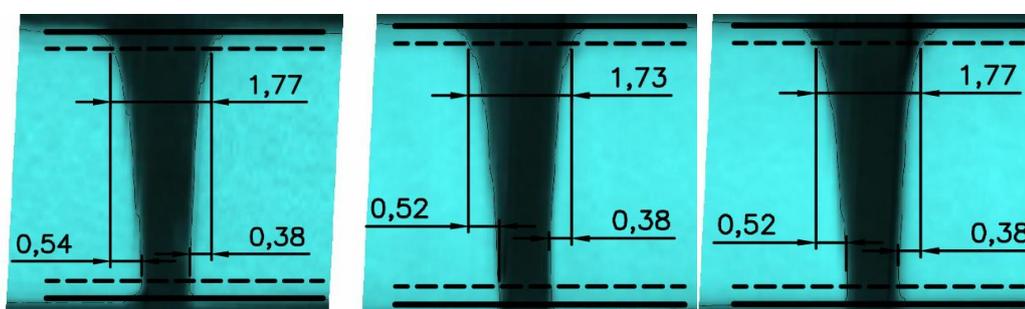


Figura D.42 - Amostra 42.

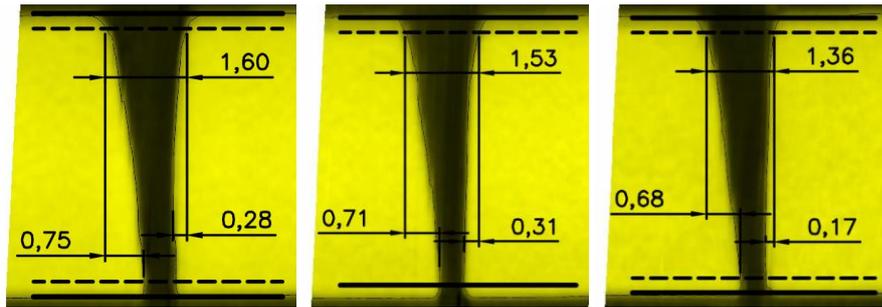


Figura D.43 - Amostra 43.

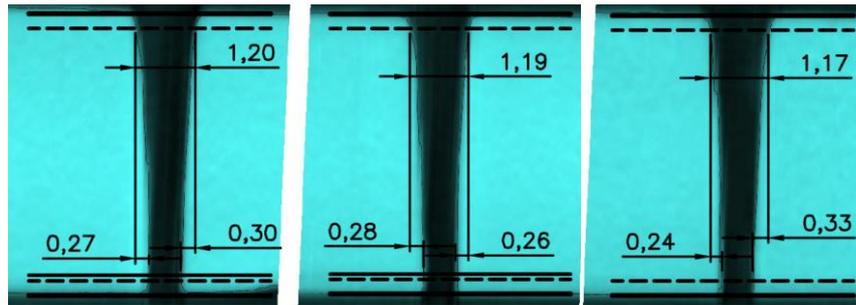


Figura D.44 - Amostra 44.

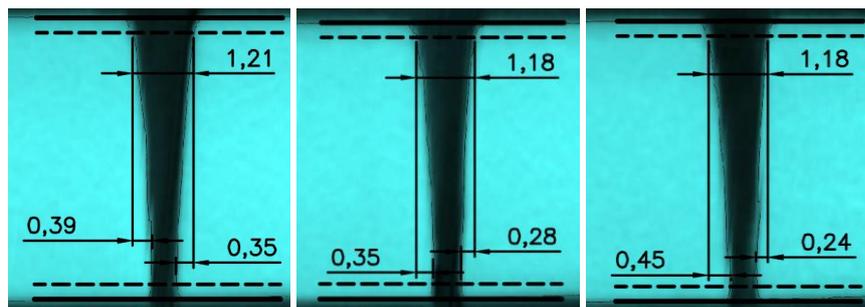


Figura D.45 - Amostra 45.

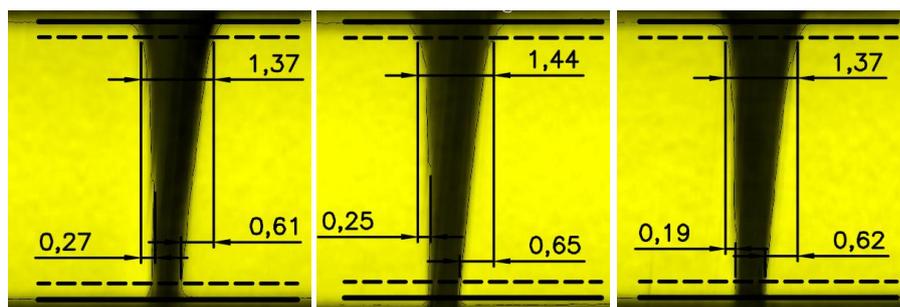


Figura D.46 - Amostra 46.

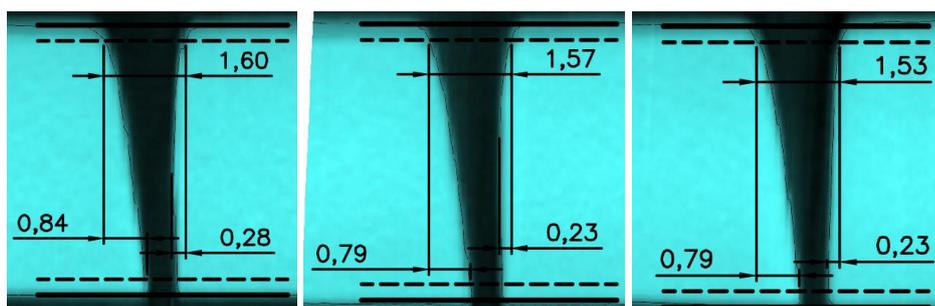


Figura D.47 - Amostra 47.

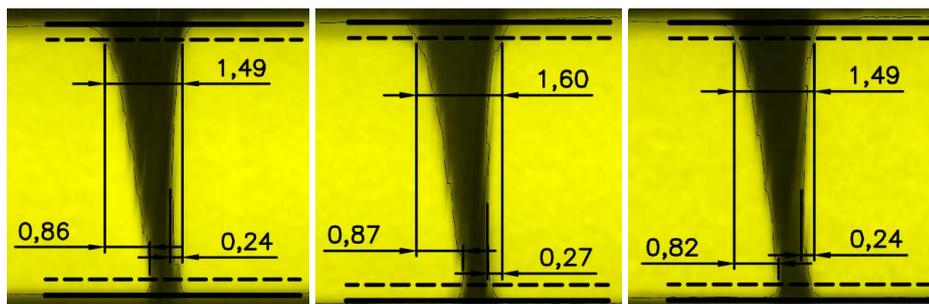


Figura D.48 - Amostra 48.

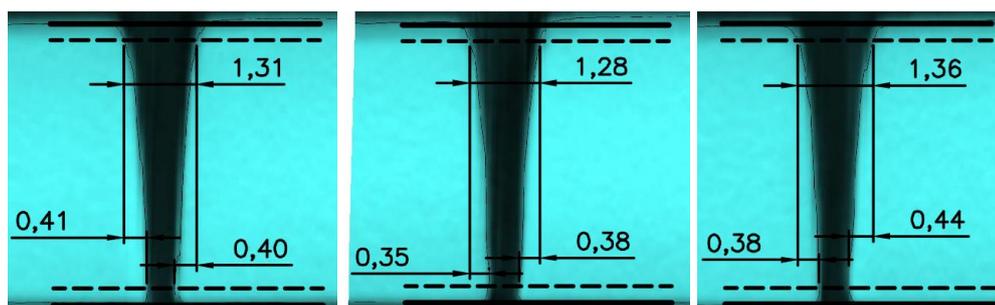


Figura D.49 - Amostra 49.

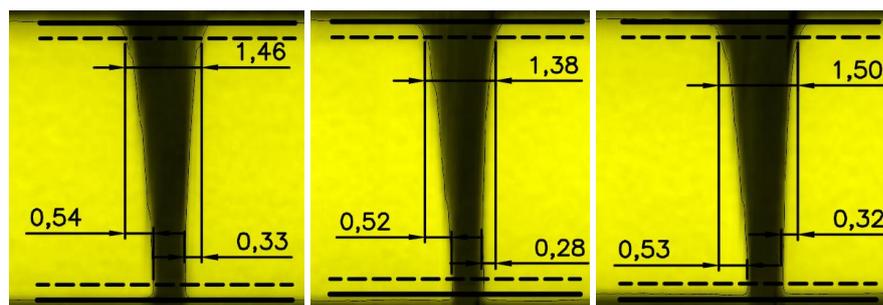


Figura D.50 - Amostra 50.

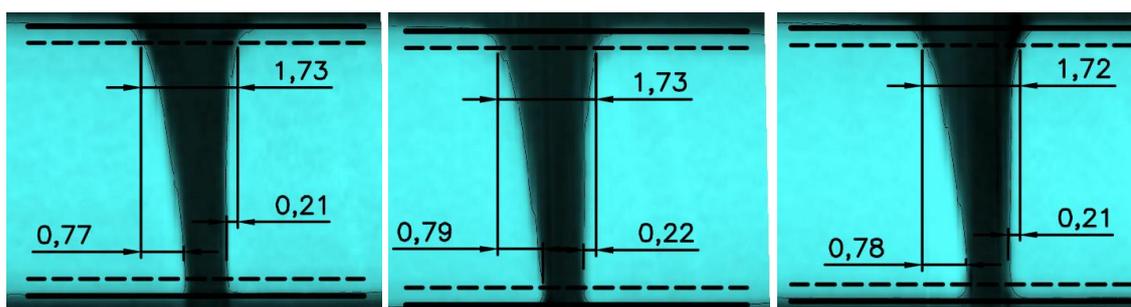


Figura D.51 - Amostra 51.

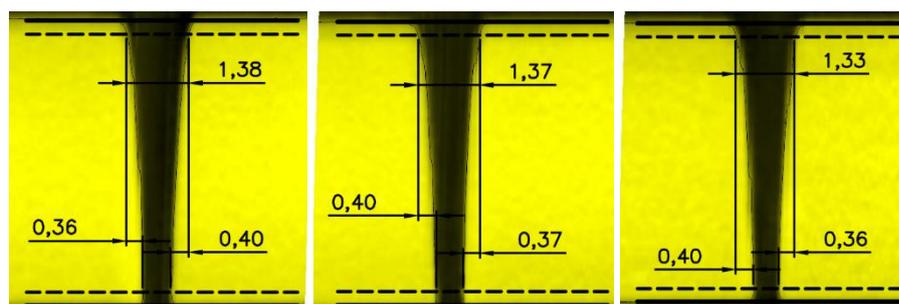


Figura D.52 - Amostra 52.

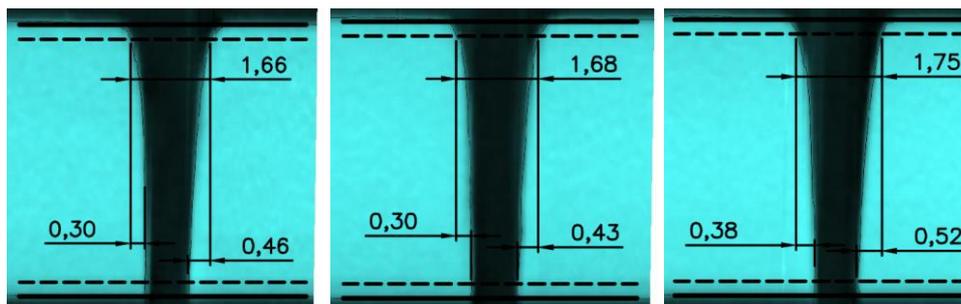


Figura D.53 - Amostra 53.

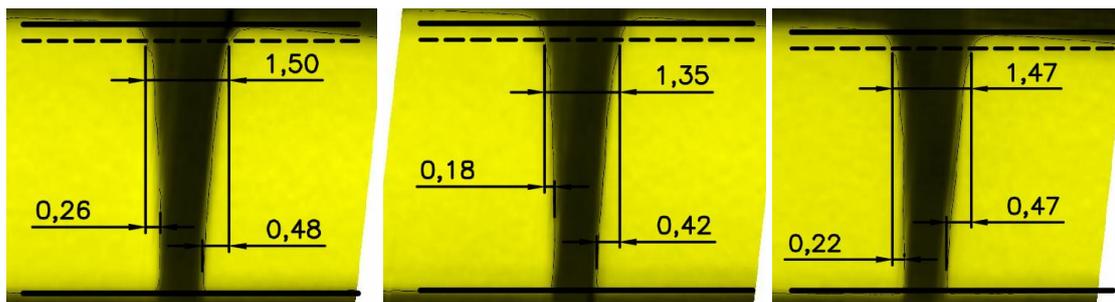


Figura D.54 - Amostra 54.

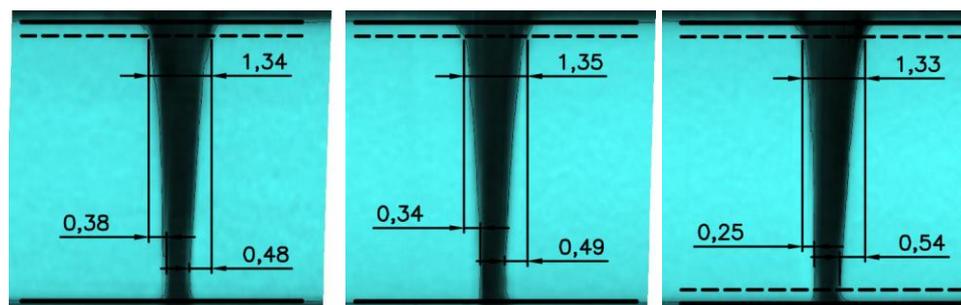


Figura D.55 - Amostra 55.

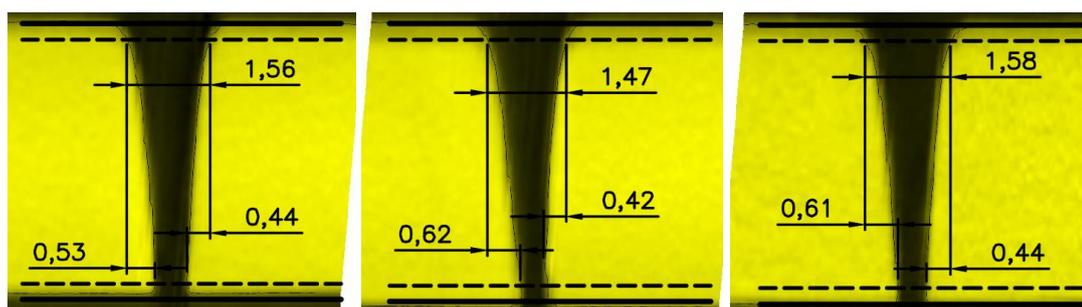


Figura D.56 - Amostra 56.

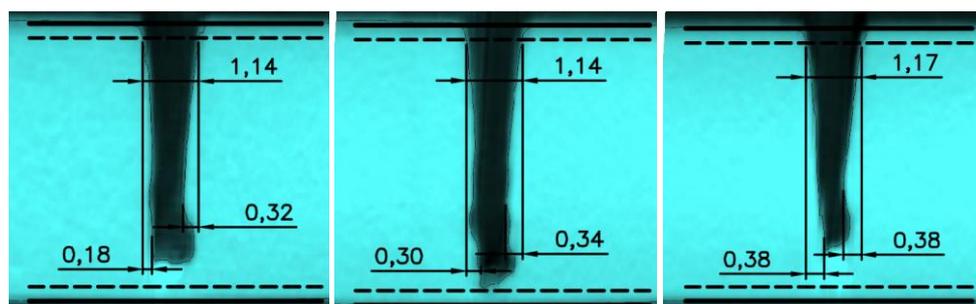


Figura D.57 - Amostra 57.

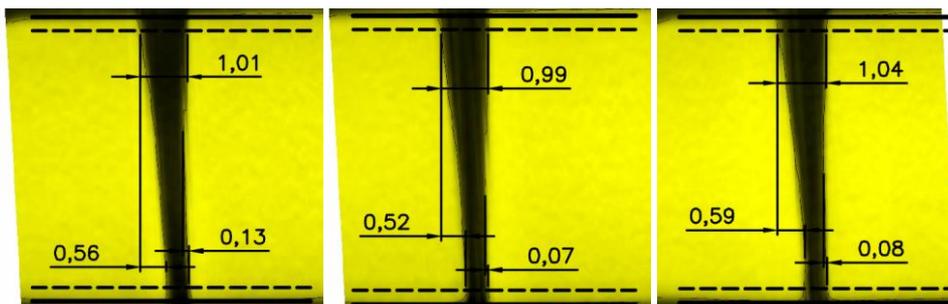


Figura D.58 - Amostra 58.

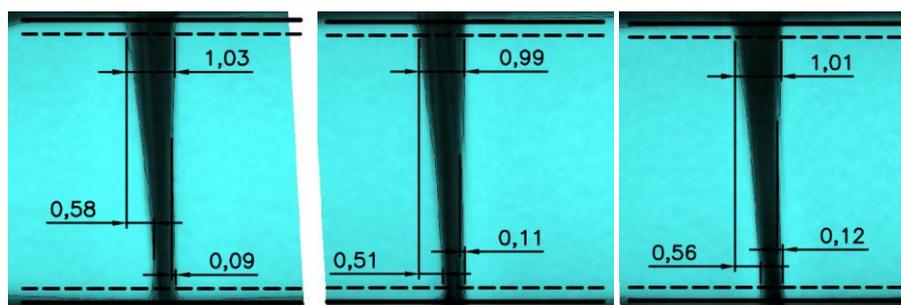


Figura D.59 - Amostra 59.

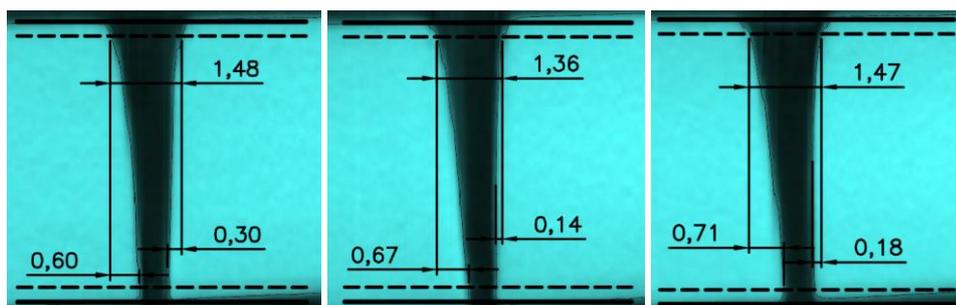


Figura D.60 - Amostra 60.

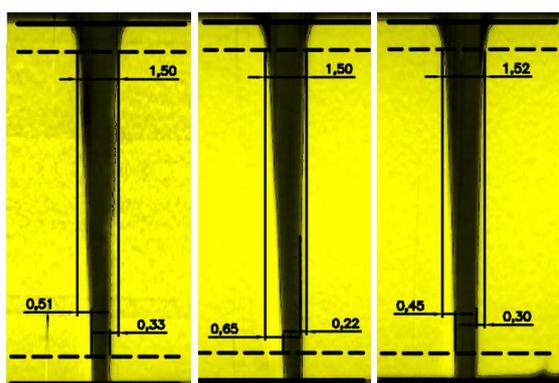


Figura D.61 - Amostra 61.

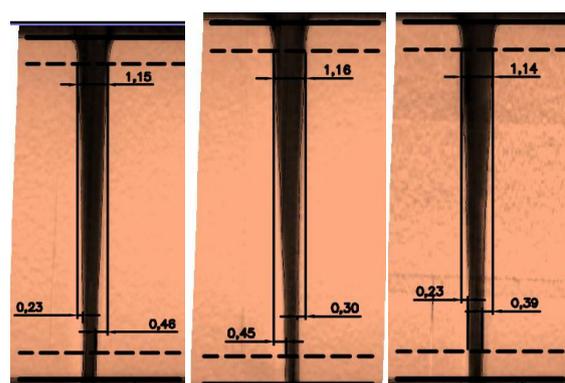


Figura D.62 - Amostra 62.

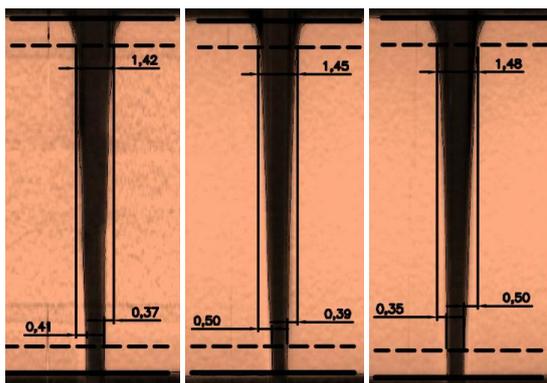


Figura D.63 - Amostra 63.

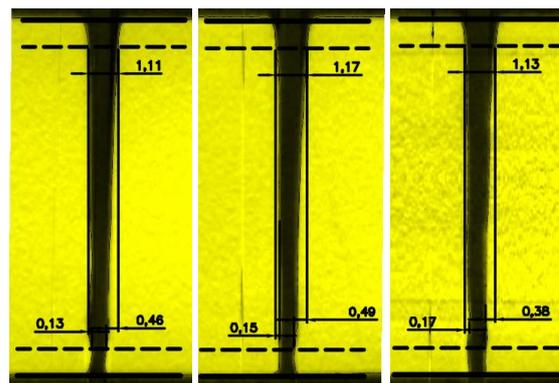


Figura D.64 - Amostra 64.

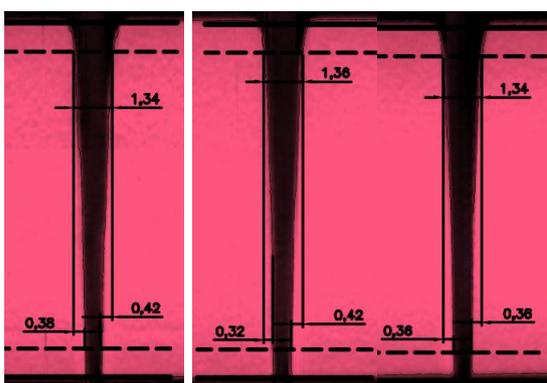


Figura D.65 - Amostra 65.

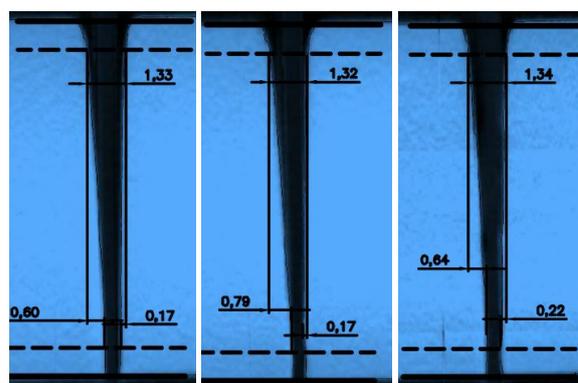


Figura D.66 - Amostra 66.

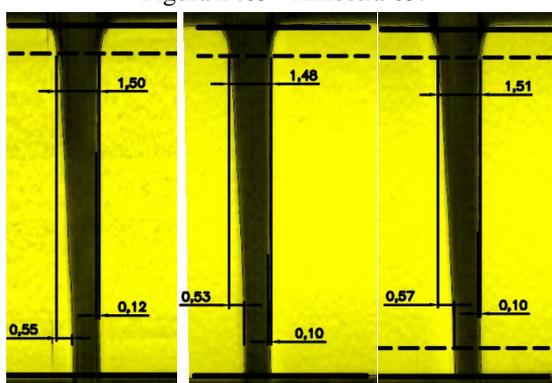


Figura D.67 - Amostra 67.

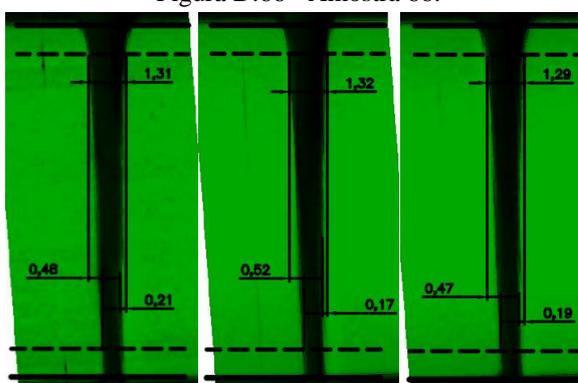


Figura D.68 - Amostra 68.

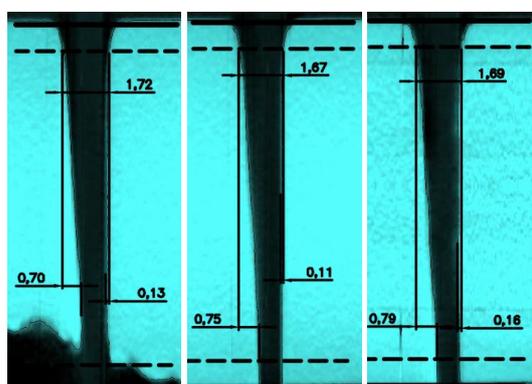


Figura D.69 - Amostra 69.

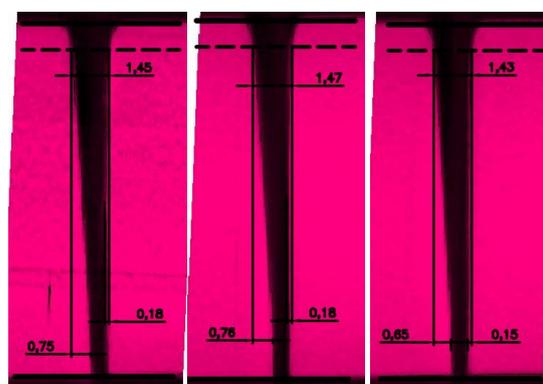


Figura D.70 - Amostra 70.

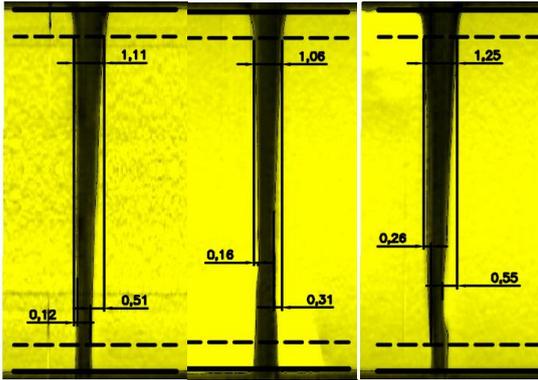


Figura D.71 - Amostra 71.

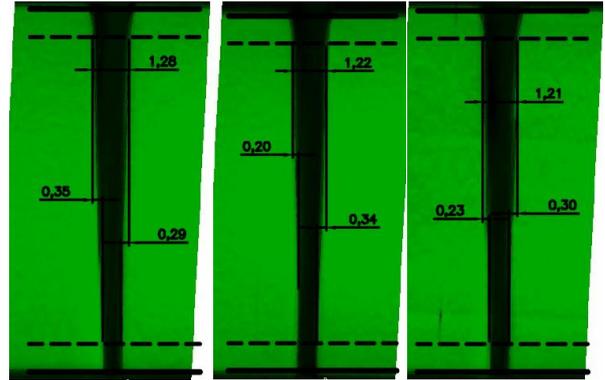


Figura D.72 - Amostra 72.

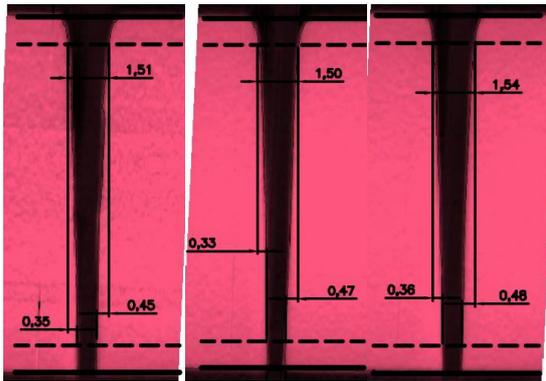


Figura D.73 - Amostra 73.

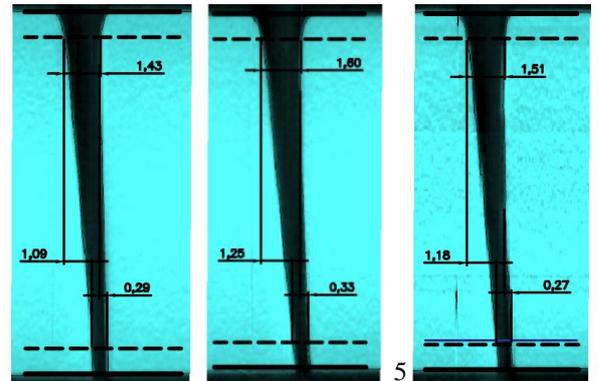


Figura D.74 - Amostra 74.

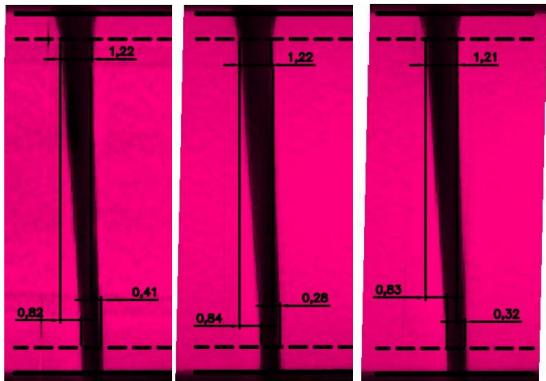


Figura D.75 - Amostra 75.

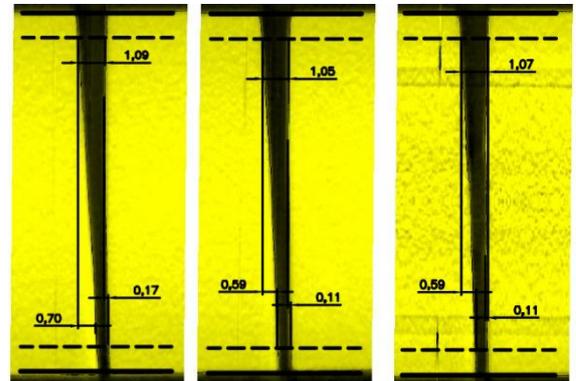


Figura D.76 - Amostra 76.

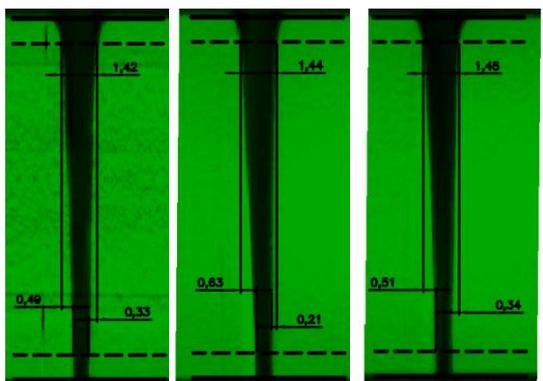


Figura D.77 - Amostra 77.

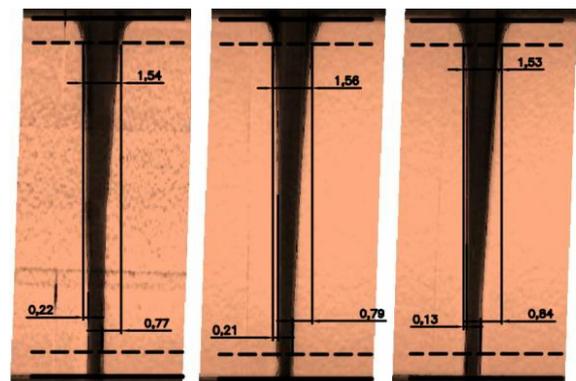


Figura D.78 - Amostra 78.

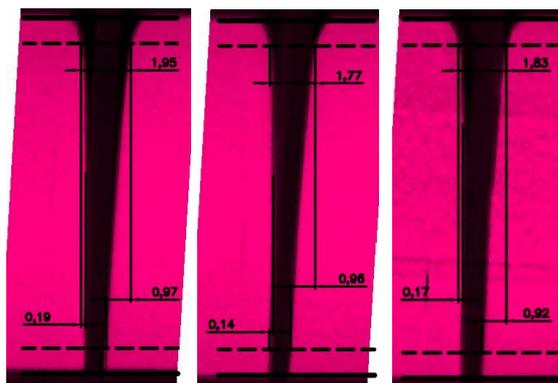


Figura D.79 - Amostra 79.

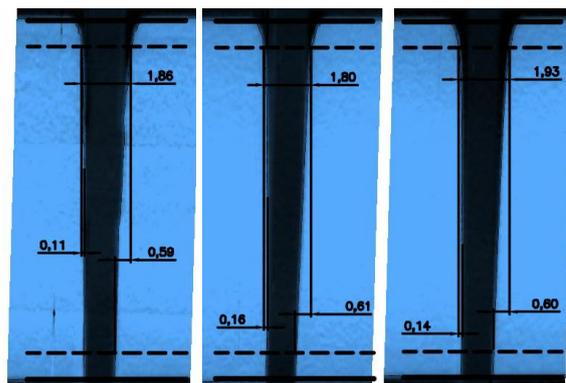


Figura D.80 - Amostra 80.

**APÊNDICE E** – Gráficos de Superfície de Resposta e de Contorno para o comportamento dos modelos de regressão gerados a partir dos experimentos de corte realizados.

Este apêndice apresenta gráficos de superfície de resposta e de contorno construídos a partir das equações 4.1 a 4.10. Estes permitem observar o comportamento dos modelos de regressão perante a variação, principalmente, da velocidade de avanço e vazão mássica de abrasivo.

### E.1 Qualidade de percepção visual

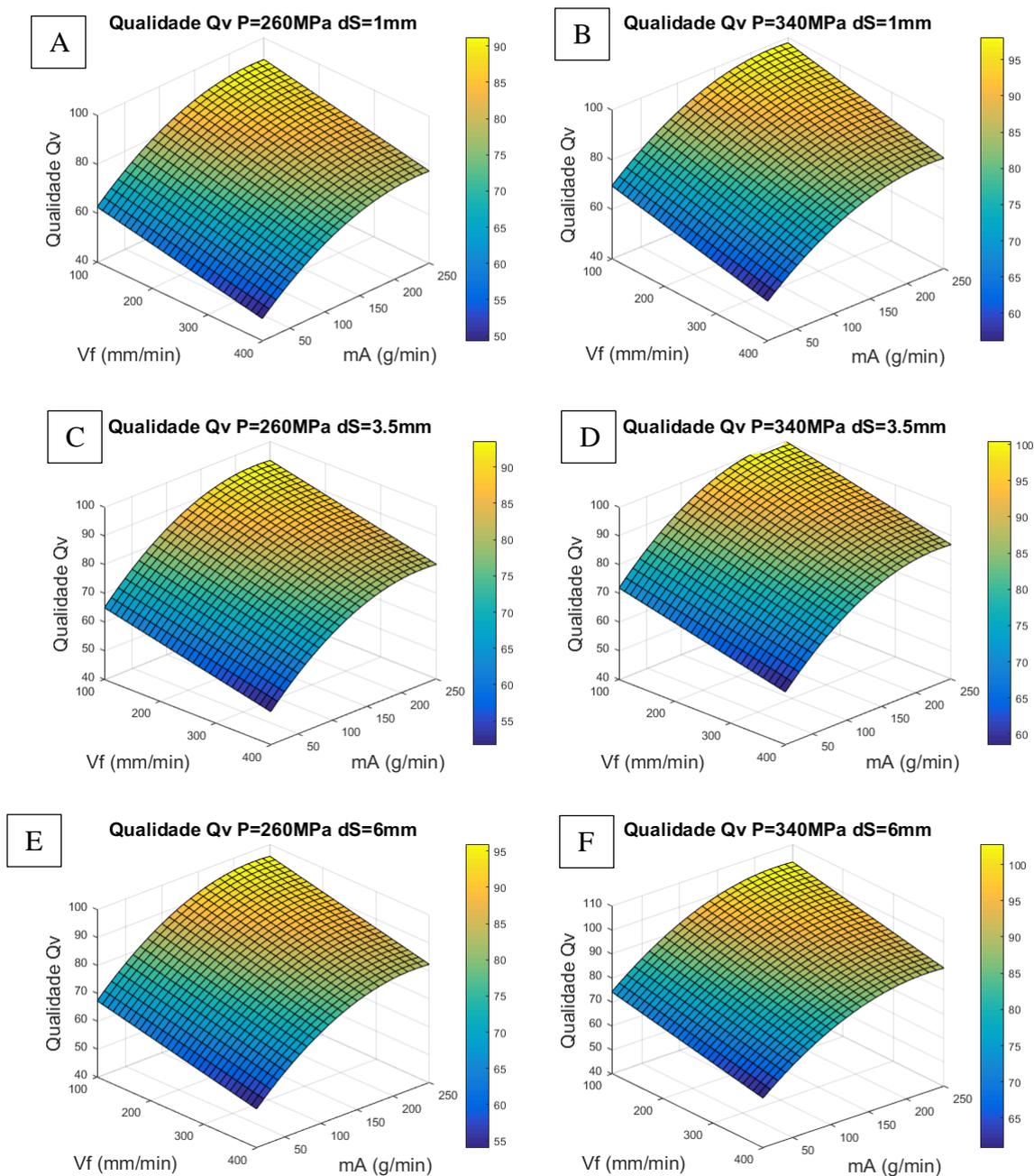


Figura E.1 – Gráficos de superfície de resposta para a qualidade da superfície usinada por AWJ em chapas finas de ágata, em A, C e E para pressão de trabalho de 260MPa, em B, D e F para pressão de trabalho de 340MPa. Em A e B para distância de afastamento da tubeira de 1 mm, em C e D para distância de afastamento da tubeira de 3.5 mm e em E e F para distância de afastamento da tubeira de 6 mm.

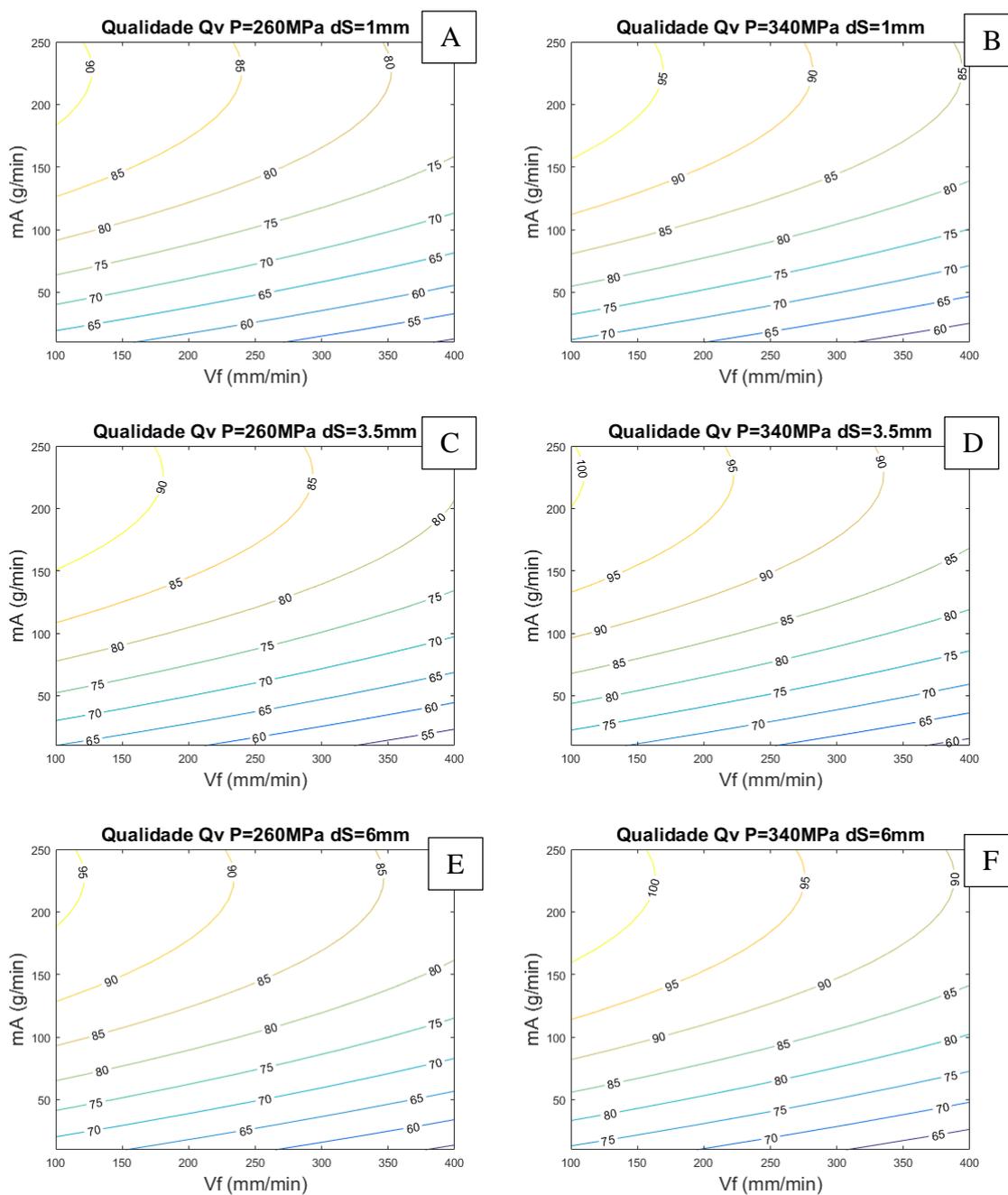


Figura E.2 – Gráficos de contorno para a qualidade da superfície usinada por AWJ em chapas finas de ágata. Em A, C e E para pressão de trabalho de 260MPa, em B, D e F para pressão de trabalho de 340MPa. Em A e B para distância de afastamento da tubeira de 1 mm, em C e D para distância de afastamento da tubeira de 3,5 mm e em E e F para distância de afastamento da tubeira de 6 mm.

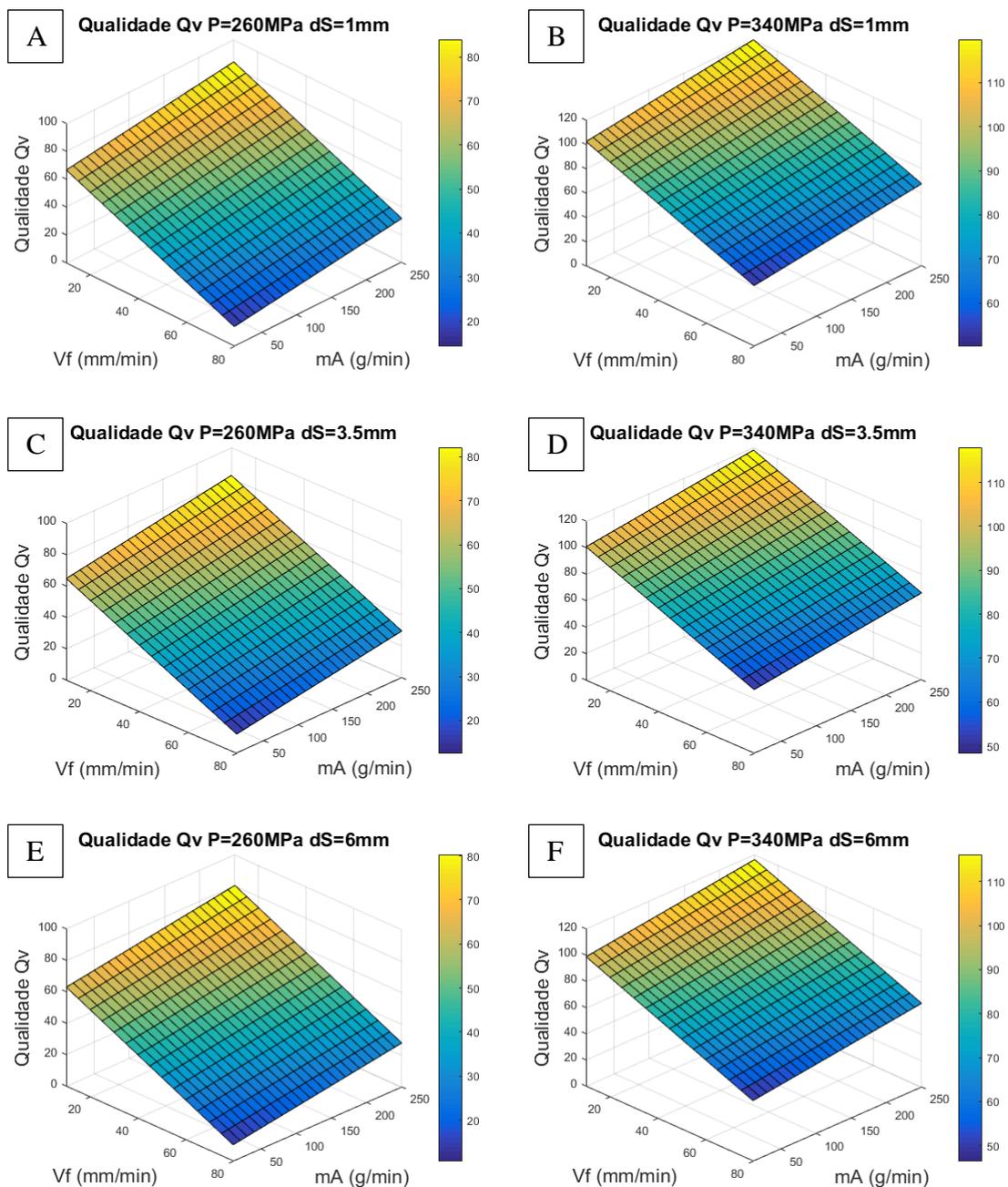


Figura E.3 – Gráficos de superfície de resposta para a qualidade da superfície usinada por AWJ em chapas grossas de ágata. Em A, C e E para pressão de trabalho de 260MPa, em B, D e F para pressão de trabalho de 340MPa. Em A e B para distância de afastamento da tubeira de 1 mm, em C e D para distância de afastamento da tubeira de 3,5 mm e em E e F para distância de afastamento da tubeira de 6 mm.

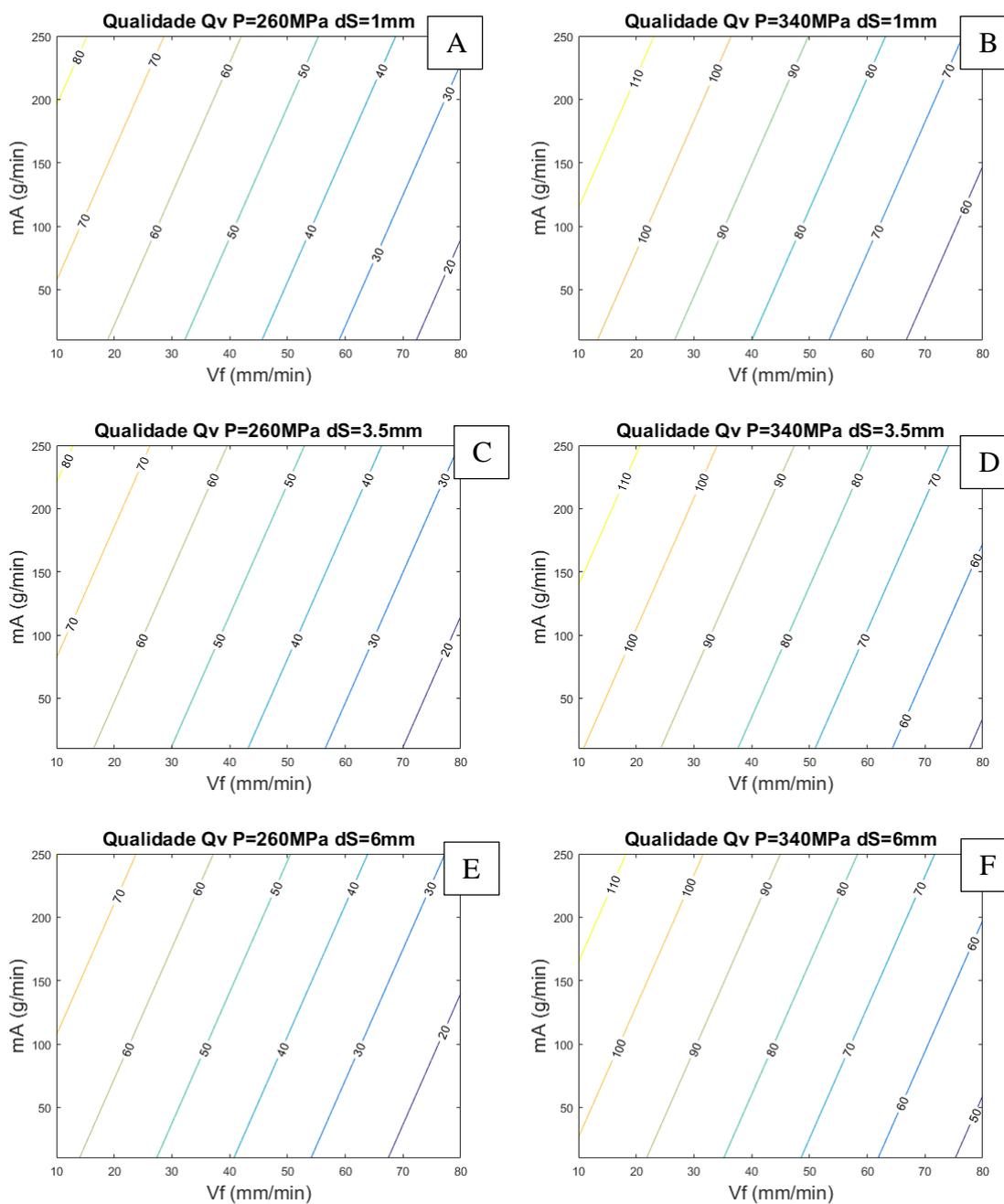


Figura E.4 – Gráficos de contorno para a qualidade da superfície usinada por AWJ em chapas grossas de ágata. Em A, C e E para pressão de trabalho de 260MPa, em B, D e F para pressão de trabalho de 340MPa. Em A e B para distância de afastamento da tubeira de 1 mm, em C e D para distância de afastamento da tubeira de 3,5 mm e em E e F para distância de afastamento da tubeira de 6 mm.

## E.2 Largura de fenda

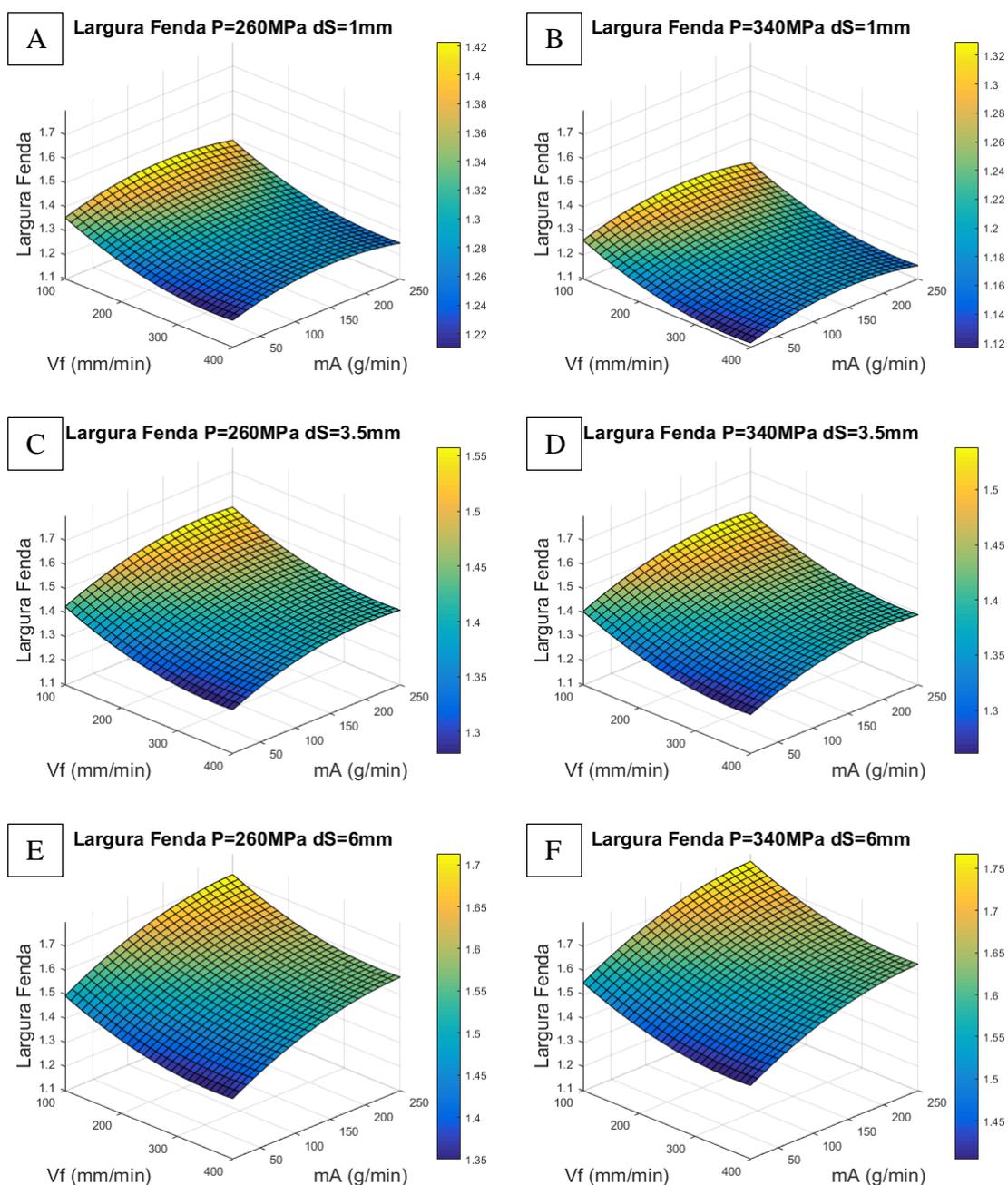


Figura E.5 – Gráficos de superfície de resposta para a largura de fenda usinada por AWJ em chapas finas de ágata. Em A, C e E para pressão de trabalho de 260MPa, em B, D e F para pressão de trabalho de 340MPa. Em A e B para distância de afastamento da tubeira de 1 mm, em C e D para distância de afastamento da tubeira de 3,5 mm e em E e F para distância de afastamento da tubeira de 6 mm.

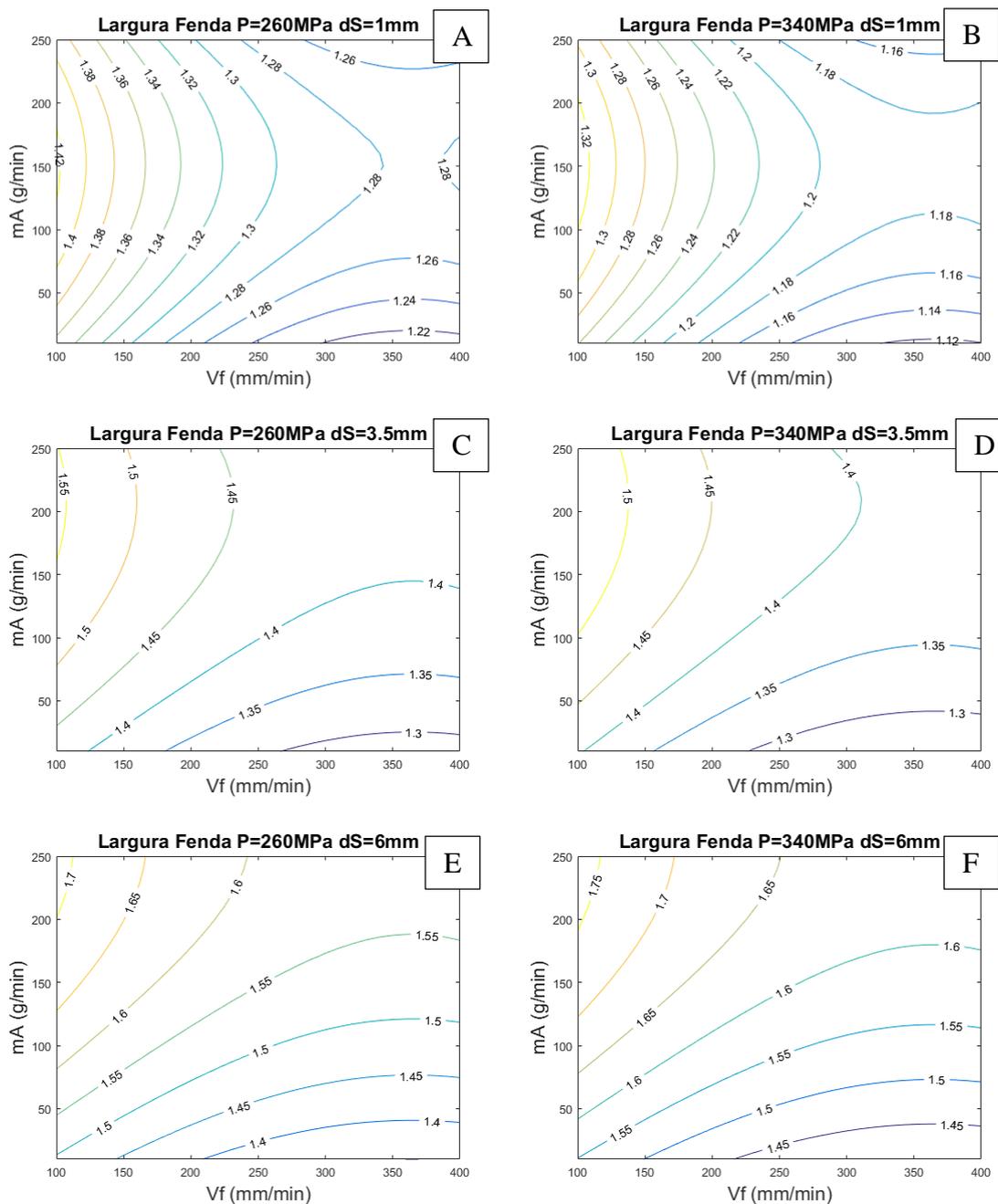


Figura E.6 – Gráficos de contorno para a largura de fenda usinada por AWJ em chapas finas de ágata. Em A, C e E para pressão de trabalho de 260MPa, em B, D e F para pressão de trabalho de 340MPa. Em A e B para distância de afastamento da tubeira de 1 mm, em C e D para distância de afastamento da tubeira de 3,5 mm e em E e F para distância de afastamento da tubeira de 6 mm.

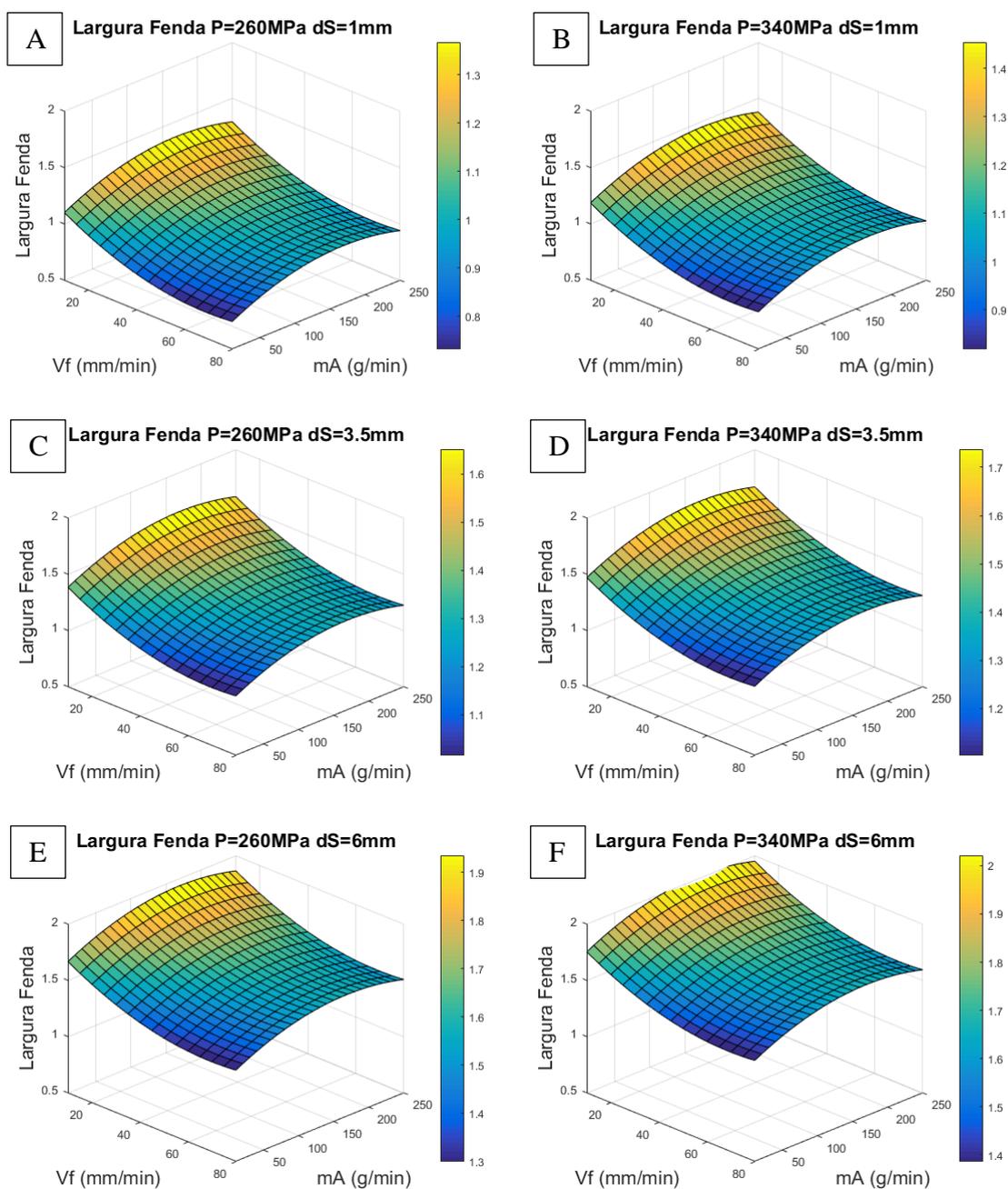


Figura E.7 – Gráficos de superfície de resposta para a largura de fenda usinada por AWJ em chapas grossas de ágata. Em A, C e E para pressão de trabalho de 260MPa, em B, D e F para pressão de trabalho de 340MPa. Em A e B para distância de afastamento da tubeira de 1 mm, em C e D para distância de afastamento da tubeira de 3,5 mm e em E e F para distância de afastamento da tubeira de 6 mm.

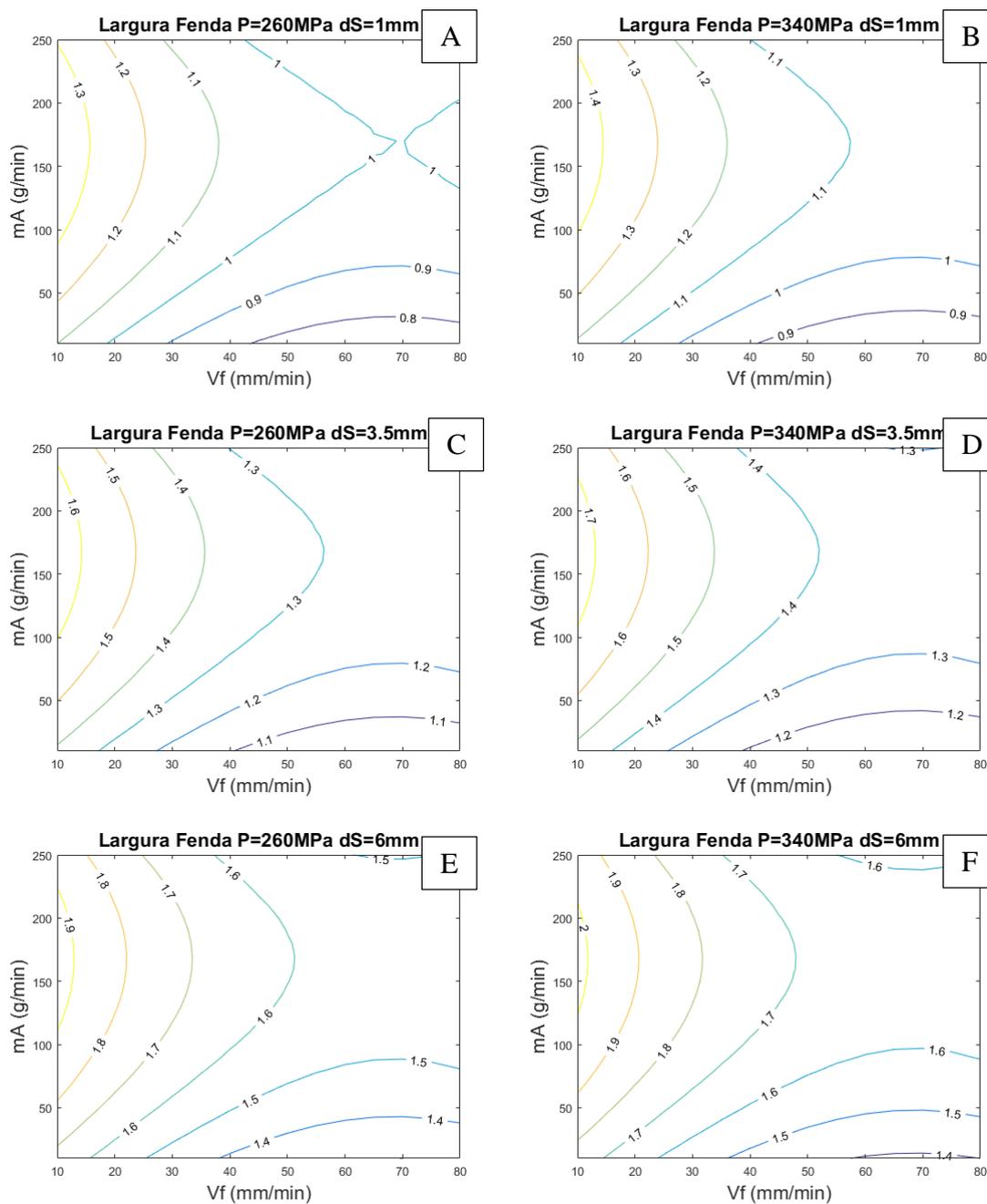


Figura E.8 – Gráficos de contorno para a largura de fenda usinada por AWJ em chapas grossas de ágata. Em A, C e E para pressão de trabalho de 260MPa, em B, D e F para pressão de trabalho de 340MPa. Em A e B para distância de afastamento da tubeira de 1 mm, em C e D para distância de afastamento da tubeira de 3,5 mm e em E e F para distância de afastamento da tubeira de 6 mm.

### E.3 Perpendicularidade

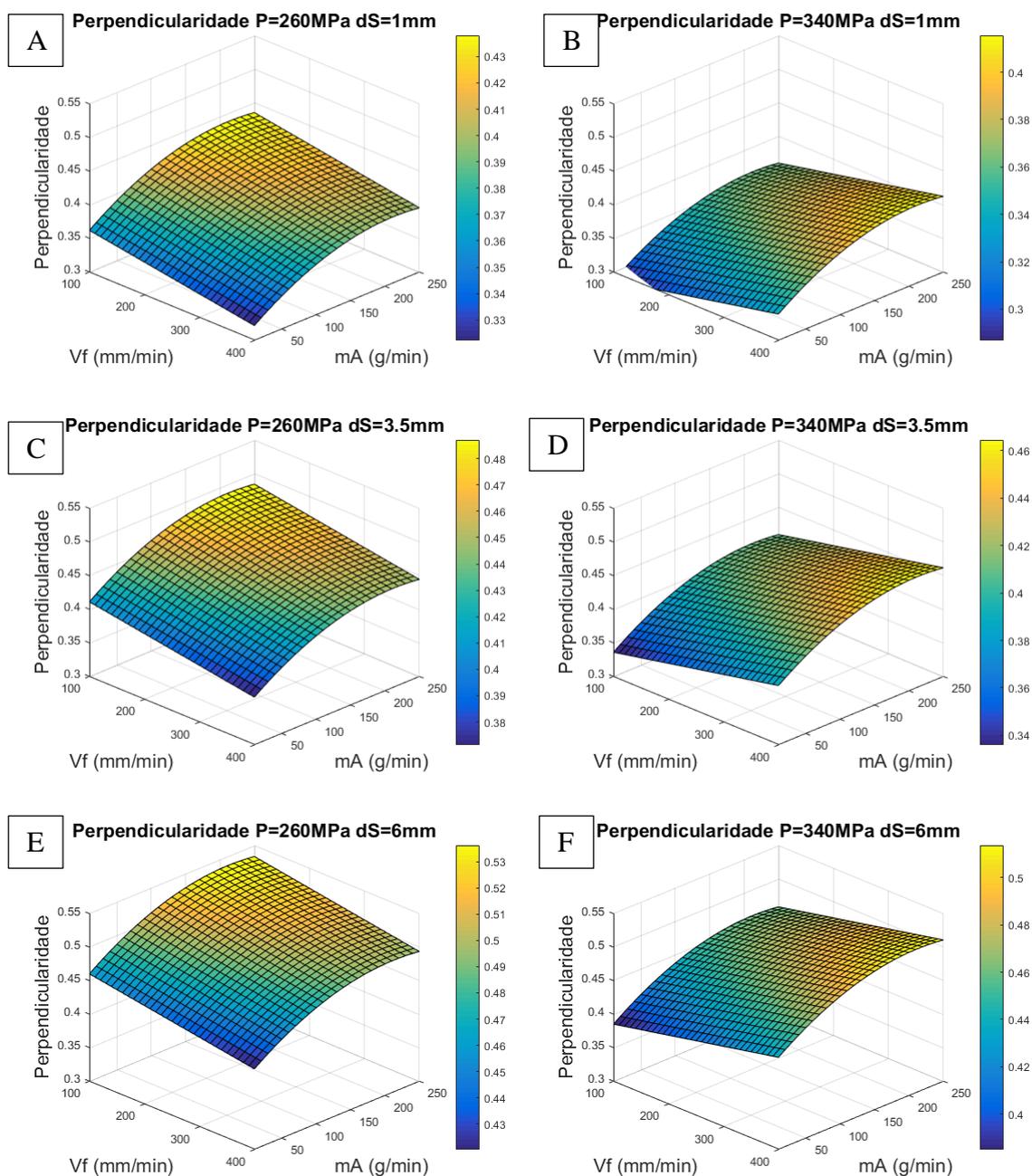


Figura E.9 – Gráficos de superfície de resposta para o desvio de perpendicularidade em chapas finas de ágata usinada por AWJ. Em A, C e E para pressão de trabalho de 260MPa, em B, D e F para pressão de trabalho de 340MPa. Em A e B para distância de afastamento da tubeira de 1 mm, em C e D para distância de afastamento da tubeira de 3,5 mm e em E e F para distância de afastamento da tubeira de 6 mm.

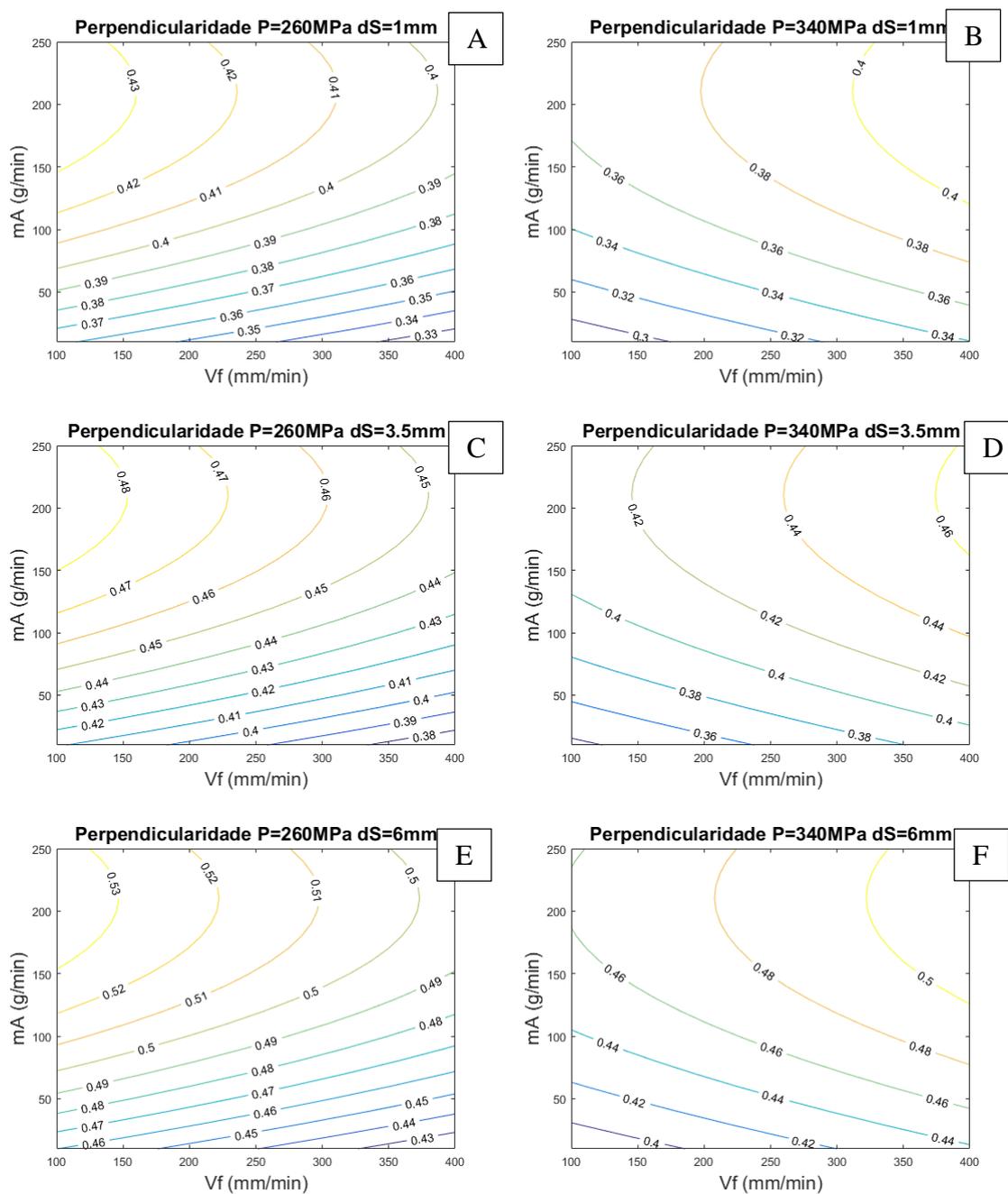


Figura E.10 – Gráficos de contorno para o desvio de perpendicularidade em chapas finas de ágata usinada por AWJ. Em A, C e E para pressão de trabalho de 260MPa, em B, D e F para pressão de trabalho de 340MPa. Em A e B para distância de afastamento da tubeira de 1 mm, em C e D para distância de afastamento da tubeira de 3,5 mm e em E e F para distância de afastamento da tubeira de 6 mm.

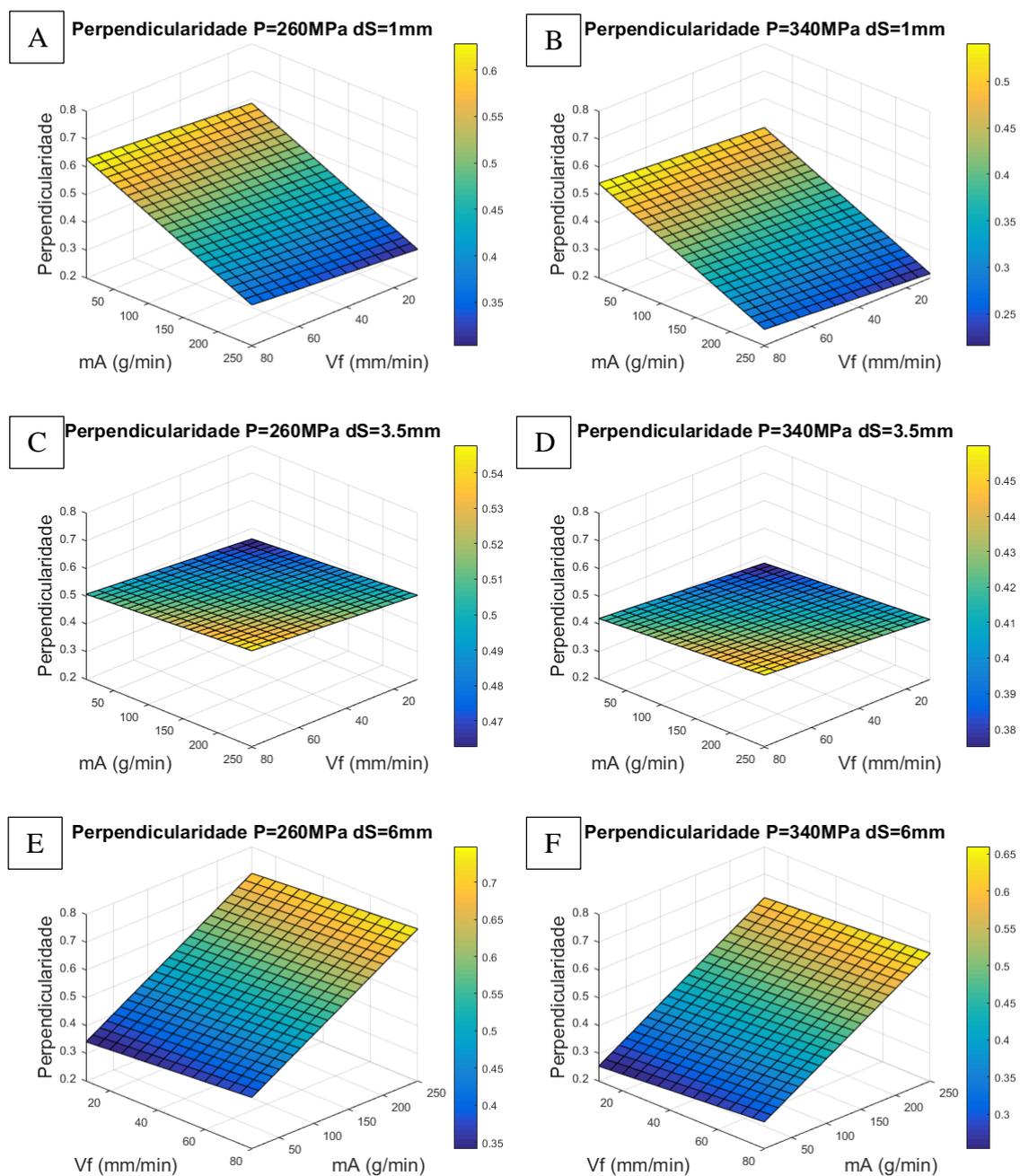


Figura E.11 – Gráficos de superfície de resposta para o desvio de perpendicularidade em chapas grossas de ágata usinada por AWJ. Em A, C e E para pressão de trabalho de 260MPa, em B, D e F para pressão de trabalho de 340MPa. Em A e B para distância de afastamento da tubeira de 1 mm, em C e D para distância de afastamento da tubeira de 3,5 mm e em E e F para distância de afastamento da tubeira de 6 mm.

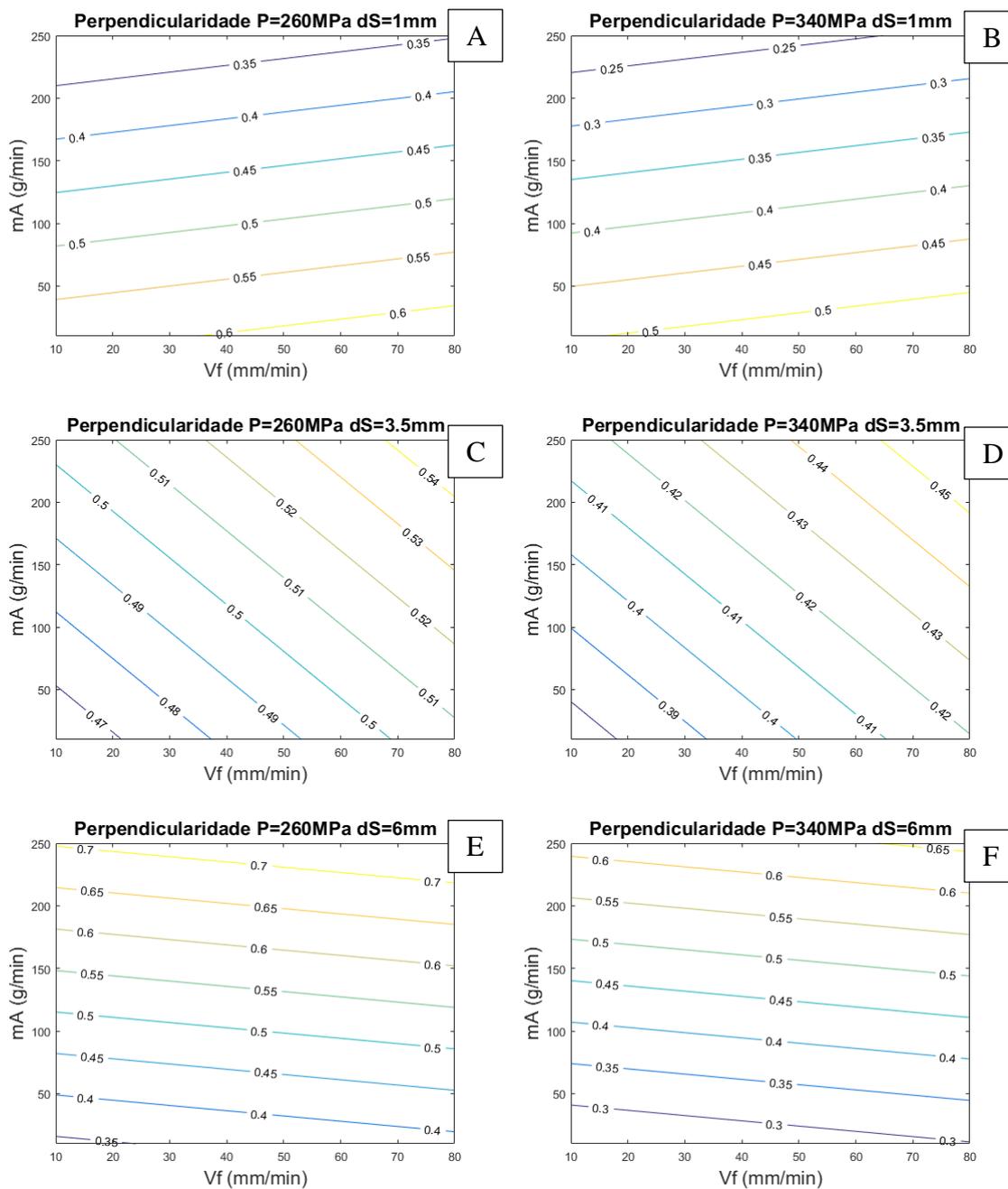


Figura E.12 – Gráficos de contorno para o desvio de perpendicularidade em chapas grossas de ágata usinada por AWJ. Em A, C e E para pressão de trabalho de 260MPa, em B, D e F para pressão de trabalho de 340MPa. Em A e B para distância de afastamento da tubeira de 1 mm, em C e D para distância de afastamento da tubeira de 3,5 mm e em E e F para distância de afastamento da tubeira de 6 mm.

### E.4 Rugosidade média

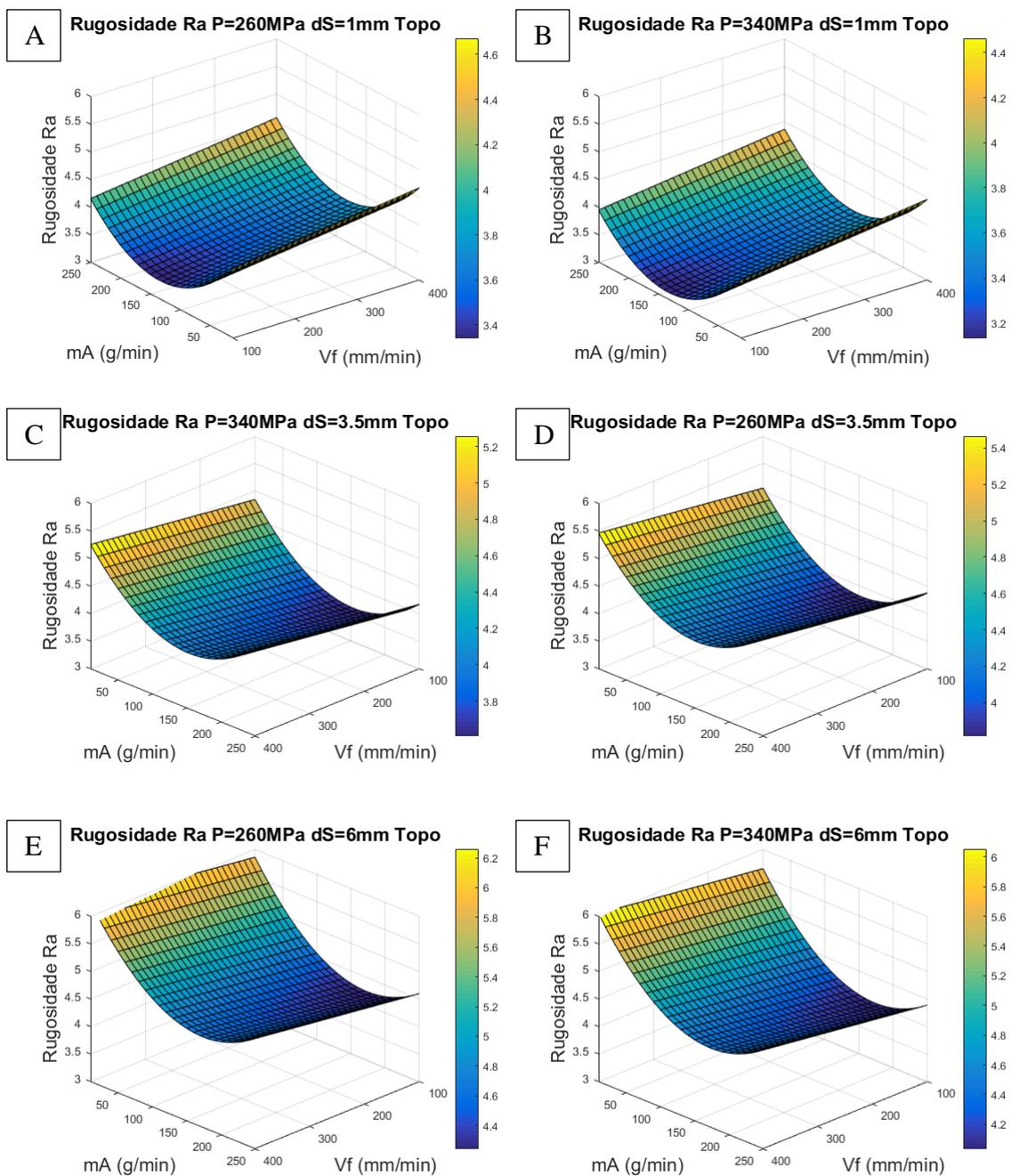


Figura E.13 – Gráficos de superfície de resposta para a rugosidade Ra da superfície usinada por AWJ em chapas finas de ágata, medidas no topo da superfície. Em A, C e E para pressão de trabalho de 260MPa, em B, D e F para pressão de trabalho de 340MPa. Em A e B para distância de afastamento da tubeira de 1 mm, em C e D para distância de afastamento da tubeira de 3,5 mm e em E e F para distância de afastamento da tubeira de 6 mm.

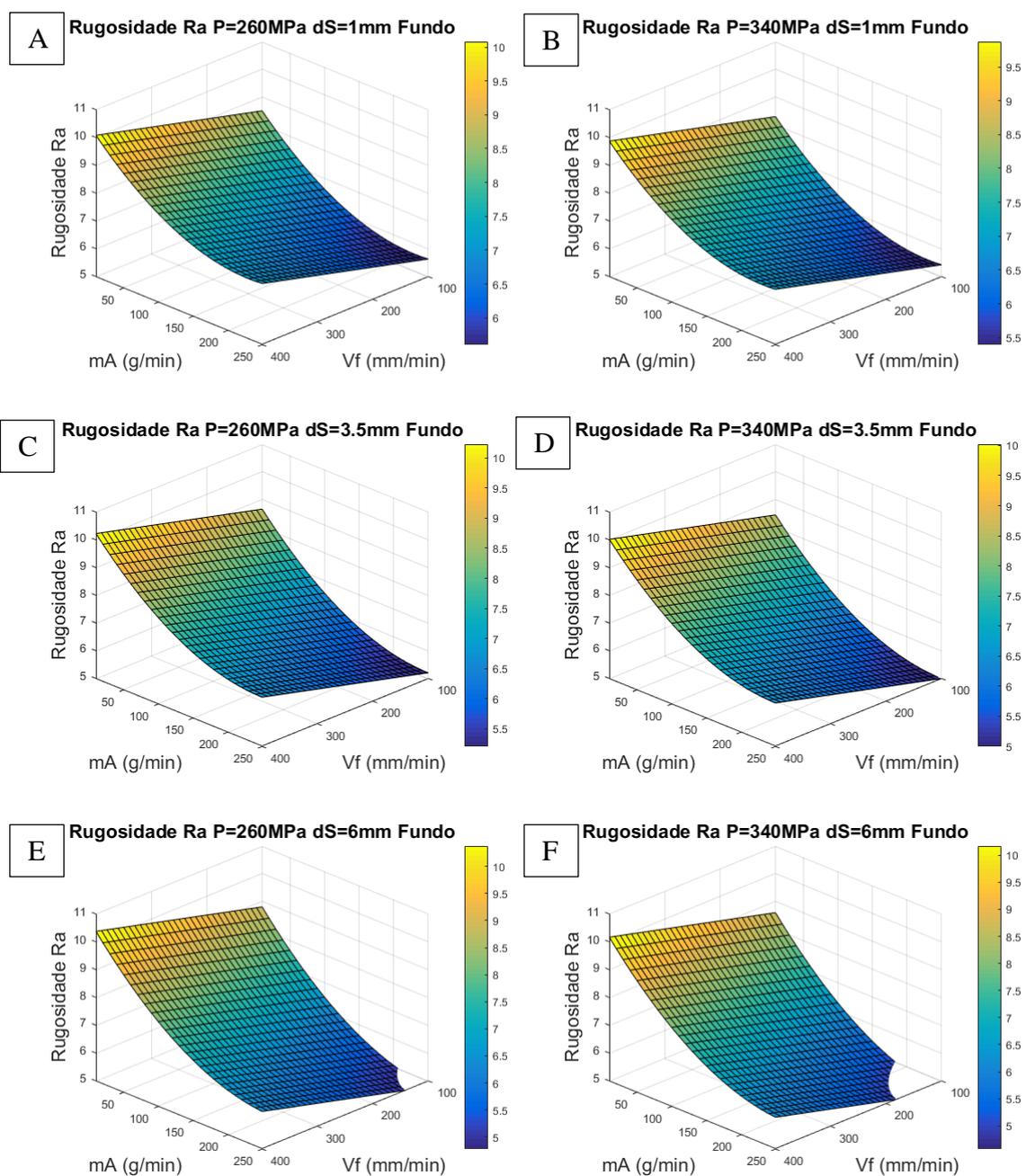


Figura E.14 – Gráficos de superfície de resposta para a rugosidade Ra da superfície usinada por AWJ em chapas finas de ágata, medidas no fundo da superfície. Em A, C e E para pressão de trabalho de 260MPa, em B, D e F para pressão de trabalho de 340MPa. Em A e B para distância de afastamento da tubeira de 1 mm, em C e D para distância de afastamento da tubeira de 3,5 mm e em E e F para distância de afastamento da tubeira de 6 mm.

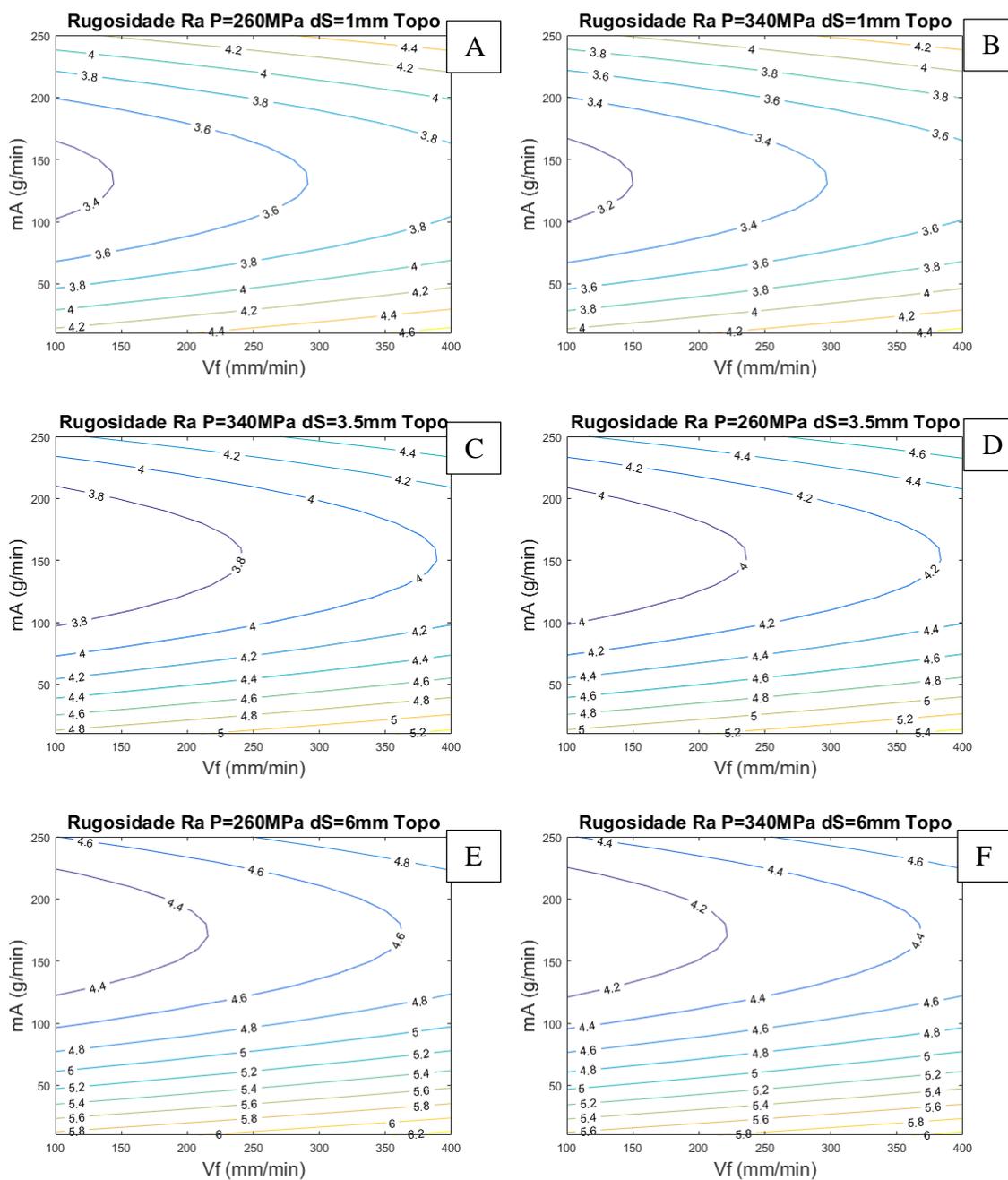


Figura E.15 – Gráficos de contorno para a rugosidade Ra da superfície usinada por AWJ em chapas finas de ágata, medidas no topo da superfície. Em A, C e E para pressão de trabalho de 260MPa, em B, D e F para pressão de trabalho de 340MPa. Em A e B para distância de afastamento da tubeira de 1 mm, em C e D para distância de afastamento da tubeira de 3,5 mm e em E e F para distância de afastamento da tubeira de 6 mm.

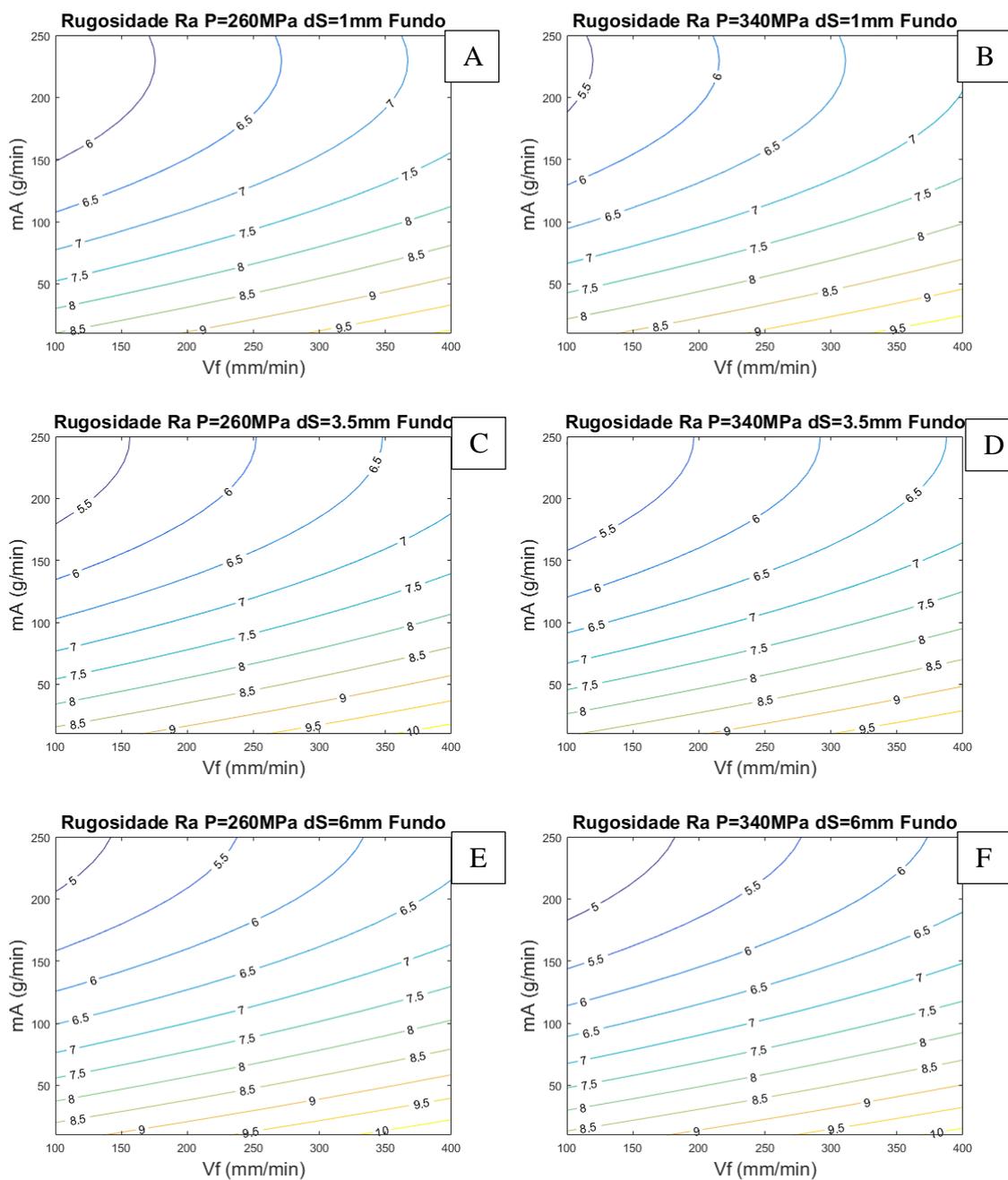


Figura E.16 – Gráficos de contorno para a rugosidade  $R_a$  da superfície usinada por AWJ em chapas finas de ágata, medidas no fundo da superfície. Em A, C e E para pressão de trabalho de 260MPa, em B, D e F para pressão de trabalho de 340MPa. Em A e B para distância de afastamento da tubeira de 1 mm, em C e D para distância de afastamento da tubeira de 3,5 mm e em E e F para distância de afastamento da tubeira de 6 mm.

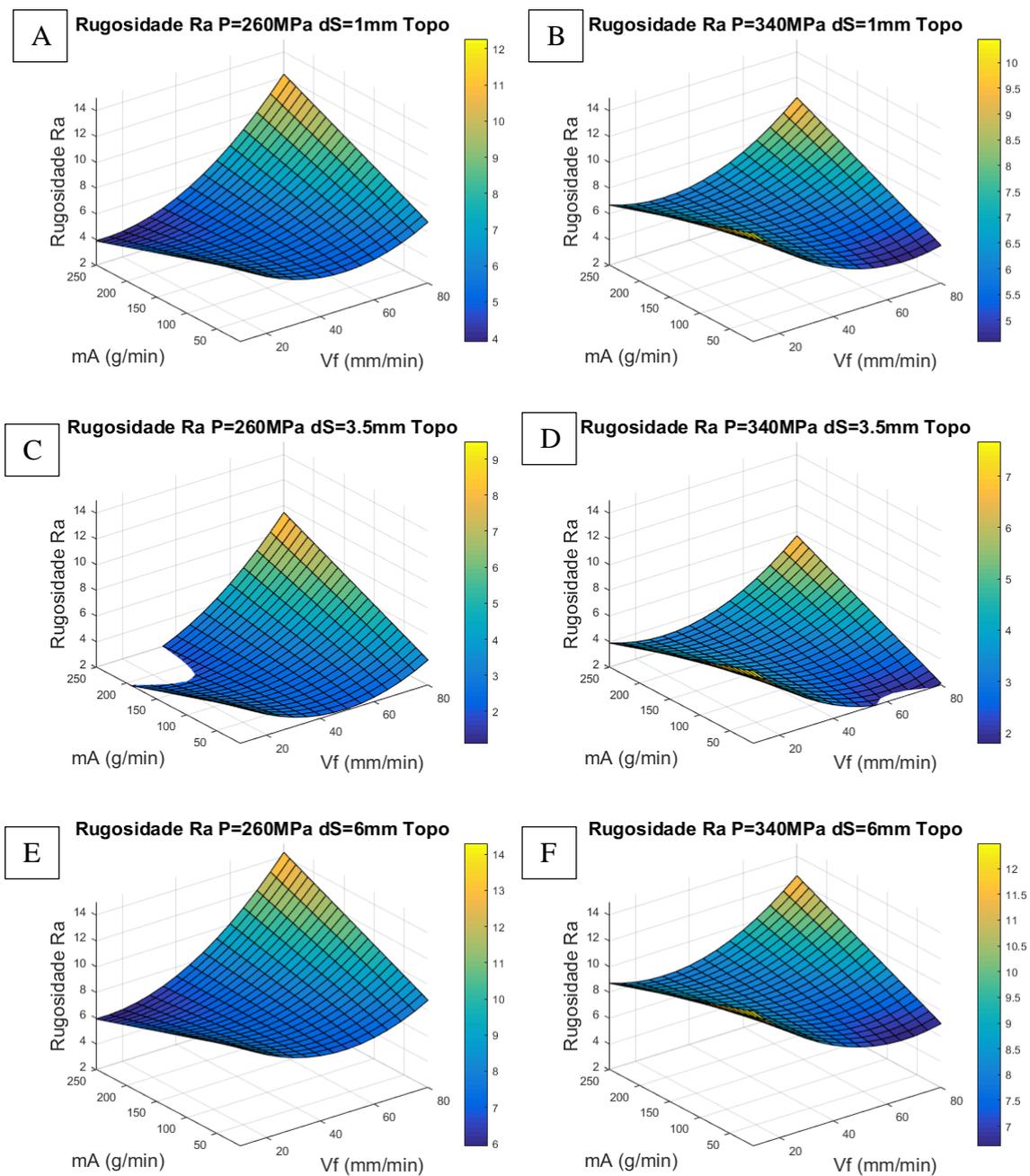


Figura E.17 – Gráficos de superfície de resposta para a rugosidade média Ra da superfície usinada por AWJ em chapas grossas de ágata, medidas no topo da superfície. Em A, C e E para pressão de trabalho de 260MPa, em B, D e F para pressão de trabalho de 340MPa. Em A e B para distância de afastamento da tubeira de 1 mm, em C e D para distância de afastamento da tubeira de 3,5 mm e em E e F para distância de afastamento da tubeira de 6 mm.

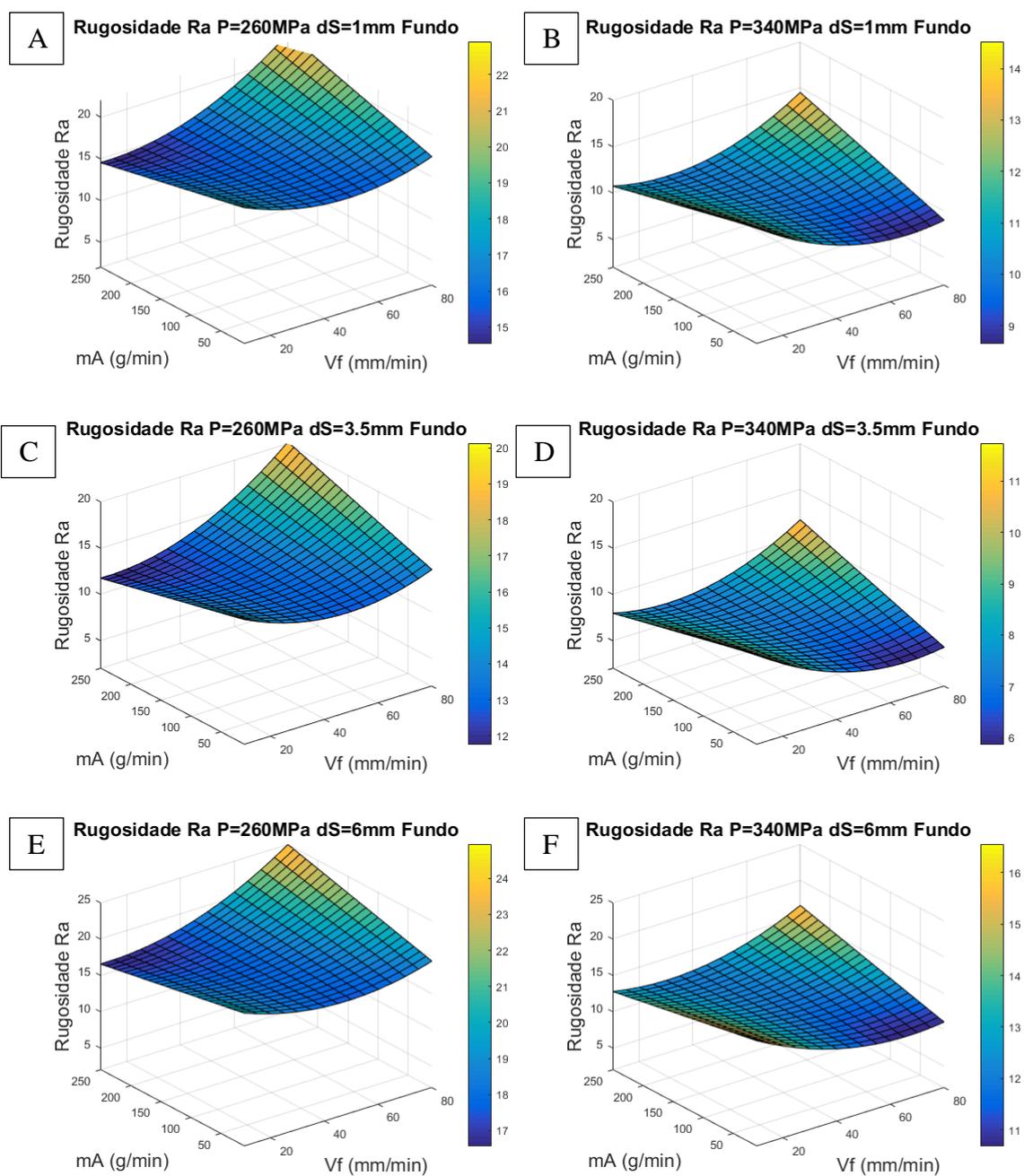


Figura E.18 – Gráficos de superfície de resposta para a rugosidade média  $R_a$  da superfície usinada por AWJ em chapas grossas de ágata, medidas no fundo da superfície. Em A, C e E para pressão de trabalho de 260MPa, em B, D e F para pressão de trabalho de 340MPa. Em A e B para distância de afastamento da tubeira de 1 mm, em C e D para distância de afastamento da tubeira de 3,5 mm e em E e F para distância de afastamento da tubeira de 6 mm.

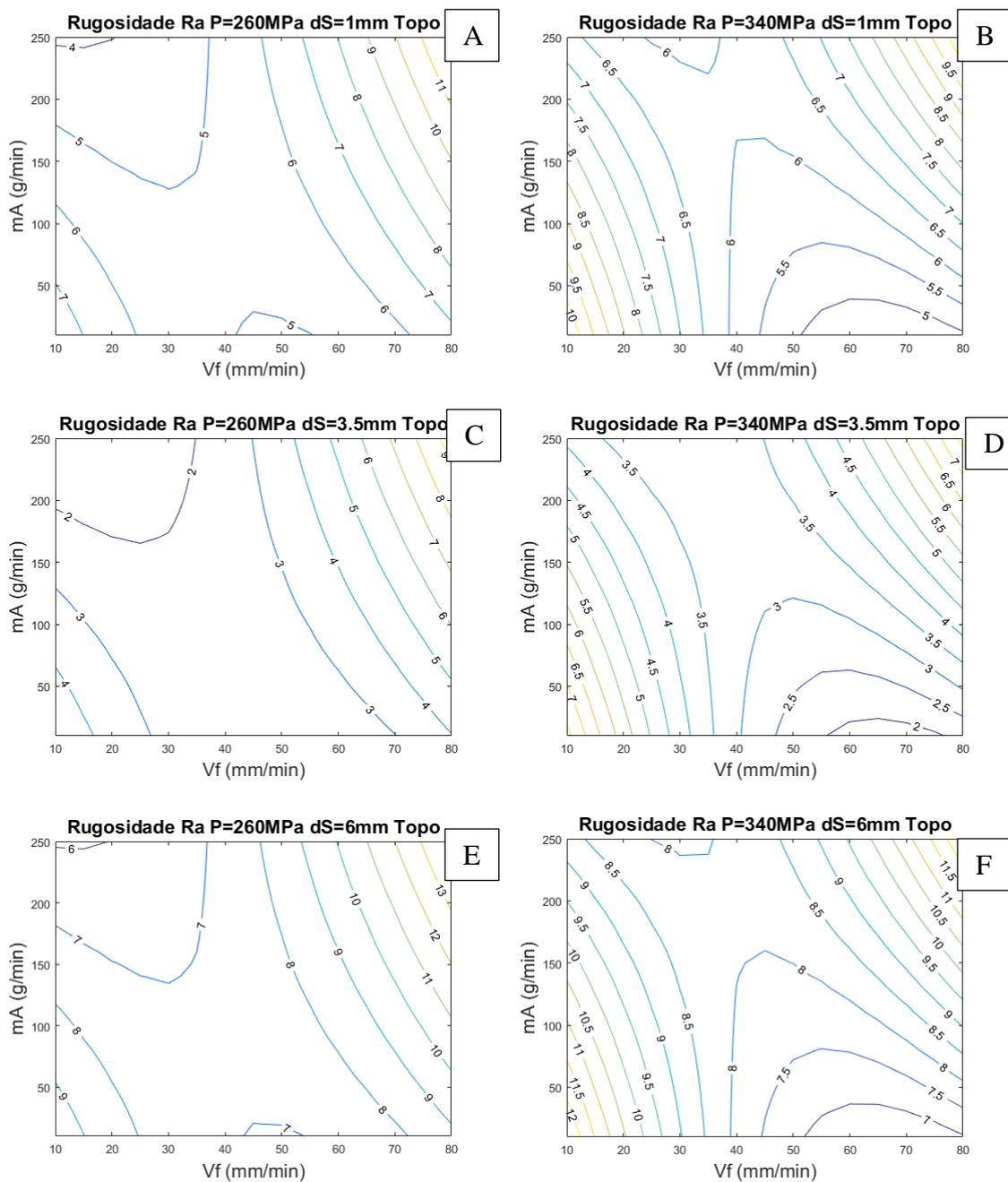


Figura E.19 – Gráficos de contorno para a rugosidade  $R_a$  da superfície usinada por AWJ em chapas grossas de ágata, medidas no topo da superfície. Em A, C e E para pressão de trabalho de 260MPa, em B, D e F para pressão de trabalho de 340MPa. Em A e B para distância de afastamento da tubeira de 1 mm, em C e D para distância de afastamento da tubeira de 3,5 mm e em E e F para distância de afastamento da tubeira de 6 mm.

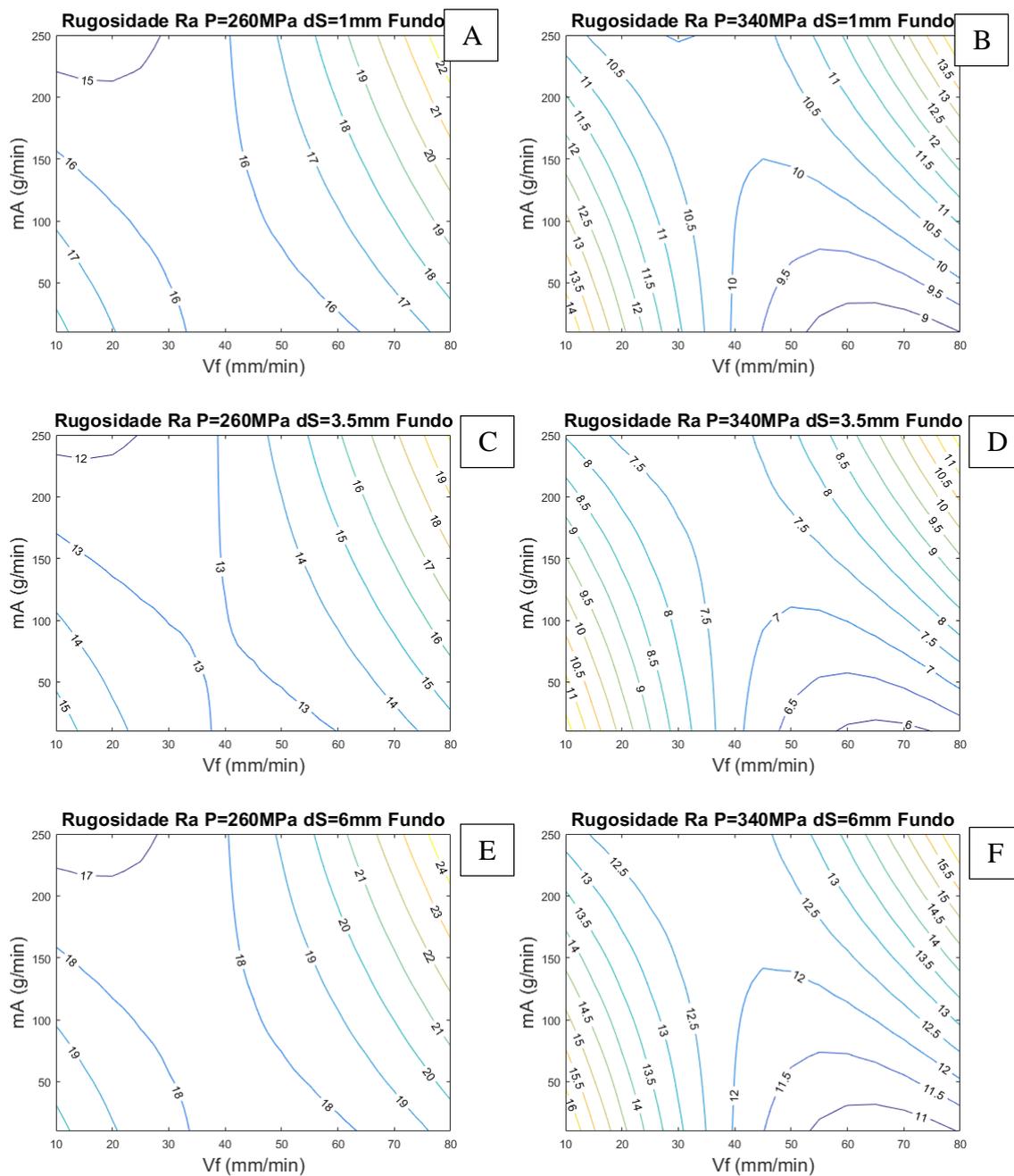


Figura E.20 – Gráficos de contorno para a rugosidade Ra da superfície usinada por AWJ em chapas grossas de ágata, medidas no fundo da superfície. Em A, C e E para pressão de trabalho de 260MPa, em B, D e F para pressão de trabalho de 340MPa. Em A e B para distância de afastamento da tubeira de 1 mm, em C e D para distância de afastamento da tubeira de 3,5 mm e em E e F para distância de afastamento da tubeira de 6 mm.

**APÊNDICE F** – Medições de qualidade de percepção visual ( $Q_V$ ), largura de fenda ( $k_w$ ) e desvio de perpendicularidade ( $u$ ).

Tabela F.1 – Medições de qualidade visual, largura de fenda e desvio de perpendicularidade – Bloco 01.

Amostra	Qualidade - $Q_V$ - %		Largura de fenda - $k_w$ - mm		Perpendicularidade - $u$ - mm	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP
1	23,54	1,86	1,274	0,090	0,370	0,123
2	48,86	2,00	1,358	0,026	0,386	0,141
3	26,68	2,44	1,182	0,040	0,325	0,129
4	36,72	3,12	1,244	0,024	0,390	0,151
5	44,12	1,48	1,338	0,078	0,454	0,280
6	77,91	3,88	1,484	0,068	0,370	0,087
7	64,63	3,12	1,456	0,036	0,447	0,242
8	93,93	3,69	1,634	0,023	0,512	0,057
9	41,78	3,17	1,362	0,034	0,418	0,076
10	56,98	2,10	1,334	0,046	0,426	0,127
11	33,62	3,89	1,426	0,039	0,469	0,064
12	100,00	0,00	1,692	0,019	0,515	0,040
13	54,38	3,07	1,478	0,013	0,490	0,079
14	59,81	3,11	1,470	0,022	0,451	0,132
15	50,51	2,65	1,224	0,026	0,305	0,111
16	50,76	1,04	1,608	0,049	0,544	0,087
17	26,94	2,44	1,526	0,030	0,511	0,144
18	58,74	3,80	1,330	0,029	0,389	0,194
19	64,29	4,92	1,678	0,050	0,590	0,043
20	56,76	7,83	1,264	0,018	0,365	0,198

Tabela F.2 – Medições de qualidade visual, largura de fenda e desvio de perpendicularidade – Bloco 02.

Amostra	Qualidade - $Q_V$ - %		Largura de fenda - $k_w$ - mm		Perpendicularidade - $u$ - mm	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP
21	60,43	1,59	1,206	0,015	0,326	0,266
22	41,09	2,84	1,176	0,040	0,587	0,223
23	25,39	1,47	1,276	0,210	0,653	0,375
24	29,86	1,29	1,136	0,036	0,616	0,219
25	100,00	0,00	1,738	0,023	0,449	0,337
26	63,19	1,38	1,436	0,060	0,483	0,049
27	65,13	3,54	1,418	0,041	0,386	0,148
28	60,40	5,11	1,338	0,072	0,423	0,152
29	24,35	3,42	1,103	0,041	0,649	0,327
30	29,59	4,28	1,326	0,030	0,395	0,053
31	26,35	5,02	1,260	0,080	0,381	0,133
32	26,50	4,15	1,235	0,054	0,654	0,238
33	31,04	1,35	1,235	0,024	0,430	0,156
34	44,07	1,65	1,420	0,111	0,407	0,253
35	19,52	1,41	1,058	0,028	0,322	0,067
36	30,18	1,74	1,618	0,022	0,575	0,271
37	11,47	1,50	1,706	0,076	0,598	0,249
38	51,74	1,29	1,136	0,015	0,483	0,207
39	25,17	1,38	1,346	0,017	0,701	0,263
40	31,65	4,97	1,276	0,015	0,587	0,378

Tabela F.3 – Medições de qualidade visual, largura de fenda e desvio de perpendicularidade – Bloco 03.

Amostra	Qualidade - $Q_V$ - %		Largura de fenda - $k_W$ - mm		Perpendicularidade - $u$ - mm	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP
41	93,36	1,75	1,392	0,059	0,330	0,127
42	100,00	0,00	1,752	0,025	0,447	0,081
43	74,92	1,61	1,444	0,069	0,464	0,264
44	64,64	2,96	1,174	0,021	0,272	0,035
45	50,76	1,61	1,202	0,025	0,351	0,072
46	81,46	4,17	1,384	0,032	0,421	0,207
47	77,56	8,88	1,558	0,029	0,511	0,306
48	64,29	1,98	1,506	0,054	0,542	0,319
49	55,41	3,07	1,322	0,030	0,384	0,031
50	75,70	4,50	1,440	0,049	0,417	0,118
51	100,00	0,00	1,754	0,045	0,522	0,298
52	91,32	5,08	1,352	0,026	0,385	0,018
53	100,00	0,00	1,710	0,047	0,403	0,079
54	84,76	4,03	1,450	0,059	0,342	0,131
55	62,86	2,45	1,352	0,023	0,417	0,099
56	50,10	5,69	1,548	0,048	0,508	0,074
57	21,56	1,85	1,160	0,037	0,329	0,046
58	41,22	4,82	1,016	0,019	0,328	0,244
59	47,41	0,64	1,004	0,017	0,332	0,231
60	75,93	2,84	1,450	0,058	0,443	0,219

Tabela F.4 – Medições de qualidade visual, largura de fenda e desvio de perpendicularidade – Bloco 04.

Amostra	Qualidade - $Q_V$ - %		Largura de fenda - $k_W$ - mm		Perpendicularidade - $u$ - mm	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP
61	83,54	3,61	1,488	0,019	0,413	0,166
62	66,43	2,10	1,150	0,022	0,350	0,096
63	88,54	13,24	1,424	0,030	0,406	0,057
64	51,48	2,10	1,132	0,033	0,307	0,156
65	74,77	3,69	1,340	0,014	0,370	0,064
66	63,19	2,88	1,332	0,008	0,431	0,242
67	100,00	0,00	1,492	0,016	0,321	0,232
68	42,50	12,53	1,302	0,013	0,339	0,160
69	64,46	6,46	1,690	0,025	0,438	0,328
70	74,97	3,72	1,448	0,029	0,438	0,295
71	37,90	3,34	1,134	0,070	0,328	0,186
72	61,69	3,19	1,242	0,031	0,282	0,050
73	76,55	5,12	1,496	0,034	0,385	0,090
74	46,08	4,99	1,500	0,063	0,741	0,459
75	60,27	9,19	1,234	0,025	0,597	0,259
76	47,23	0,08	1,072	0,015	0,374	0,265
77	45,54	1,84	1,434	0,018	0,416	0,149
78	63,05	2,55	1,542	0,013	0,493	0,327
79	87,99	5,20	1,836	0,075	0,554	0,414
80	100,00	0,00	1,882	0,063	0,365	0,247