

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

José Carlos Fortes Palau

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE PREPARAÇÃO DE
SUPERFÍCIE DE ENVELOPE MOTOR FOGUETE PARA
ADERÊNCIA DE ISOLANTE TÉRMICO EM AÇOS DE
ULTRA-ALTA-RESISTÊNCIA**

**Taubaté-SP
2011**

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

José Carlos Fortes Palau

AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE PREPARAÇÃO DE SUPERFÍCIE DE ENVELOPE MOTOR FOGUETE PARA ADERÊNCIA DE ISOLANTE TÉRMICO EM AÇOS DE ULTRA-ALTA-RESISTÊNCIA

Dissertação apresentada para obtenção do Certificado de Título de Mestre pelo Curso Mestrado Profissionalizante do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Projeto Mecânico
Orientador: Prof. Dr. José Rubens de Camargo
Co-orientador: Pesq. Dr. Silvio Fazolli

**Taubaté-SP
2011**

JOSÉ CARLOS FORTES PALAU

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE PREPARAÇÃO DE SUPERFÍCIE DE
ENVELOPE MOTOR FOGUETE PARA ADERÊNCIA DE ISOLANTE TÉRMICO EM
AÇOS DE ULTRA-ALTA-RESISTÊNCIA**

Dissertação apresentada para obtenção do Certificado de Título de Mestre pelo Curso Mestrado Profissionalizante do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Projeto Mecânico
Orientador: Prof. Dr. José Rubens de Camargo
Co-orientador: Pesq. Dr. Silvio Fazolli

Data: _____

Resultado: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Rubens de Camargo

UNITAU

Assinatura _____

Pesq. Dr. Luís Cláudio Rezende

IAE

Assinatura _____

Prof. Dr. Giorgio E. Oscare Giacaglia

UNITAU

Assinatura _____

Pesq. Dr. Silvio Fazolli

IAE

Assinatura _____

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meus pais
José de Souza Palau e Zamira Fortes Palau,
que através de seus exemplos de vida,
mostraram-me que perseverança, paciência, trabalho e amor
são valores extremamente importantes na vida.

AGRADECIMENTOS

A elaboração de uma dissertação não é um trabalho solitário, envolve muitas pessoas, que direta ou indiretamente tiveram valiosa colaboração para esta realização. Agradeço a todos sem exceção, em especial:

À Universidade de Taubaté pela oportunidade de continuidade de estudo e crescimento científico.

Aos colegas de classe, principalmente àqueles que coparticiparam de diversas etapas do curso, dividindo e auxiliando a execução das atividades, seja através de conhecimento ou amizade.

Aos amigos do Instituto de Aeronáutica e Espaço, IAE, pelo apoio recebido.

Ao prof. José Rubens de Camargo, pela parceria, orientação e amizade.

Ao meu amigo e co-orientador, Silvio Fazolli, pela confiança, amizade, atenção e apoio dado durante o desenvolvimento desse trabalho, sem os quais, este não seria possível.

Ao Silvio Macera, pela amizade e confiança em mim depositada.

Ao Pedro Paulo pelo apoio recebido na realização da análise química dos materiais e nos exames realizados na superfície das amostras por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Ao pessoal da AQI pela realização dos ensaios de jateamento e cisalhamento, em especial aos amigos da UCA que não mediram esforços para superar os obstáculos encontrados na realização dos experimentos.

A todos os funcionários da Divisão de Mecânica (AME) do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), pelo apoio técnico recebido.

A chefia da Divisão de Mecânica pelo apoio e principalmente por ter sempre mantida as portas abertas.

*“Pensar é o trabalho mais duro que há, o que
é, provavelmente, o motivo pelo qual tão
pouca gente se dedica a fazê-lo”*

Henry Ford

RESUMO

O objetivo deste trabalho é avaliar o processo atual de preparação de superfície para aderência de isolantes térmicos em envelopes motores foguetes de 1.000 mm de diâmetro, visando sua utilização no aço Maraging 18Ni300, tendo como parâmetros de comparação a rugosidade superficial e a resistência mecânica adesiva, obtida atualmente na interface colada metal/isolante térmico do aço 300M-ESR. Para isso, foram realizados experimentos de campo, com uma abordagem quantitativa, por meio da medida de rugosidade (R_a) nas superfícies de amostras de aços, submetidas a tratamento superficial mecânico de jateamento abrasivo a seco com granalha de aço de perfil angular, sendo posteriormente selecionadas e utilizadas como substrato em juntas adesivadas que, por fim, foram submetidas a ensaio mecânico de cisalhamento, para verificação da resistência mecânica adesiva. A utilização de métodos de análise estatísticos (análise de variância, teste de tukey, intervalo de confiança) aplicados aos dados coletados, permitiram estabelecer, para o processo atual uma faixa de resistência mecânica adesiva para cada aço pesquisado. Os resultados obtidos confirmam, com boa margem de segurança, que o processo atual de preparação de superfície para aderência de isolantes térmicos pode ser aplicado ao aço Maraging 18Ni300, sem que ocorra perda significativa de resistência mecânica adesiva na interface colada metal/isolante térmico.

Palavras chaves: preparação de superfície, envelope motor foguete, aderência, isolante térmico, aços de ultra-alta-resistência.

ABSTRACT

The aim of this work is to evaluate the current process of preparing the surface for adherence of thermal insulation in rocket motor of 1,000 mm diameter, seeking their use in Maraging18Ni300 steel, taking as parameters comparison the of surface roughness and mechanical adhesive strength obtained, currently, in the bonded interface metal /heat insulator 300M-ESR steel. A field experiment was conducted with a quantitative approach, by measuring surface roughness (Ra) on the surfaces of steel samples, subjected to mechanical surface treatment of dry abrasive blasting, with steel shot with angular profile and which were, subsequently, selected and used in bonded joints that were finally submitted to mechanical shear tests to verify the mechanical adhesive strength. The use of statistical methods of analysis (variance analysis, Tukey test, confidence interval), applied to selected data, allowed to establish for the current process, a range of mechanical adhesive strength for each steel investigated. The results confirm, with a good safety margin, that the current process of preparing the surface for adhesion of thermal insulation can be applied to the Maraging18Ni300 steel, without significant loss of mechanical adhesive strength in the metal /heat insulator bonded interface.

Keywords: surface preparation process, rocket motor, bonding, heat insulator, ultra-high strength steel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tubeira típica de um Motor Foguete	27
Figura 2 - Esquema de um envelope motor foguete, ilustrando os principais componentes e isolantes térmicos (proteção térmica rígida, proteção térmica flexível e liner). No detalhe menor a interface colada metal/proteção térmica rígida.....	28
Figura 3 - Evolução dos projetos e materiais utilizados pelo Programa Espacial Brasileiro	37
Figura 4 - Elementos da topografia da superfície: a) rugosidade superficial; b) ondulações; c) marcas denotando direções das irregularidades; d) falhas	44
Figura 5 – Elementos que compõem a textura de uma superfície	45
Figura 6 – Elementos que compõem o perfil de uma superfície.....	46
Figura 7 - Perfil real, cortado por um plano perpendicular.....	49
Figura 8 - Resultado da medição real da rugosidade por um rugosímetro eletromecânico	50
Figura 9 - Comprimento de amostragem.....	51
Figura 10 - Percurso de medição e comprimento de amostragem.....	51
Figura 11 - Rugosidade média – Ra.....	53
Figura 12 - Rugosidade média – Rz e Rugosidade máxima – Rmax	55
Figura 13 - Rugosidades máxima Rmax e Ry	56
Figura 14 - Representação gráfica do perfil indicando o parâmetro Rt	57
Figura 15 - Escalas de rugosidade e sua influência	57
Figura 16 - Principais métodos de medição de rugosidade e suas faixas de operação	58

Figura 17 - Efeito de uma ponta danificada sobre um perfil	59
Figura 18 - Comparação entre o perfil real e o perfil medido com um apalpador	60
Figura 19- Comparação entre perfil medido (a) com apalpador e (b) através de laser	61
Figura 20 - Representação esquemática de uma junção adesiva	63
Figura 21 - Representação das energias interfaciais e ângulo de contato	70
Figura 22 - Condições de molhabilidade de uma superfície para diferentes ângulos de contato θ	70
Figura 23 - Representação do deslocamento de um líquido sobre uma superfície rugosa	72
Figura 24- (a) líquido em contato total com a superfície, para uma superfície rugosidade com picos pouco elevados; (b) bolsões de ar sob o líquido	72
Figura 25 - Indicação da região referente às falhas coesivas, adesivas e delaminação do aderente	75
Figura 26 - Esquema de incidência de granalhas na superfície	78
Figura 27 - Perfil de rugosidade em função do formato da granalha de aço	80
Figura 28 - Processo utilizado para aplicação do jateamento na parte interna do envelope motor de 1.000 mm de diâmetro	82
Figura 29 - Aspecto do grão de abrasivo fragmentado após impacto com a superfície jateada. Fotomicrografia de MEV com aumento de 200x.....	88
Figura 30 - Grãos de granalha de aço perfil angular “Nova” com aumento de 29x no MEV.....	89
Figura 31 - Grãos de granalha de aço angular “Usada” com aumento de 40x no MEV	90

Figura 32- Representação esquemática do planejamento experimental para o equipamento 1.....	90
Figura 33 - Representação esquemática do planejamento experimental para o equipamento 2.....	91
Figura 34 - Dispositivo de ensaio de jateamento utilizado para o equipamento 1 fixado na mesa giratória.....	93
Figura 35 - Detalhe da fixação das amostras no equipamento 1	93
Figura 36 - Amostras de aço 300M-ESR e Maraging 300 sendo jateadas simultaneamente	94
Figura 37 - Detalhe do mecanismo do bico de jateamento pertencente ao equipamento 1.....	95
Figura 38 - Aspecto da superfície das amostras após tratamento superficial de jateamento abrasivo a seco com granalha de aço GH50 e limpeza com 1,1,1 tricloroetano.....	96
Figura 39 - Bico de jateamento do equipamento 2.....	97
Figura 40 - Dispositivo de ensaio para o equipamento 2, indicando o local de posicionamento do bico de jateamento para o ângulo de 30° e 60°.....	97
Figura 41- Esquema de posicionamento das amostras de aço no equipamento 2 ...	98
Figura 42 - Aspecto das amostras após o tratamento superficial de jateamento abrasivo.....	99
Figura 43 - Aspecto das amostras após limpeza com solvente clorado.....	99
Figura 44-Esboço representativo da rugosidade média–Ra.....	100
Figura 45 - Modelo de rugosímetro utilizado para a medida da rugosidade superficial nas amostras de aço	101
Figura 46- Procedimento de calibração do rugosímetro através de um bloco padrão aferido	101

Figura 47 - Apalpador do rugosímetro varrendo a superfície tratada da amostra no seu eixo longitudinal, onde são realizadas as três medidas de rugosidade com espaçamentos iguais entre elas	102
Figura 48 - Apalpador do rugosímetro varrendo a superfície tratada da amostra no seu eixo transversal, onde serão realizadas três medidas de rugosidade com espaçamentos iguais entre elas.	102
Figura 49 - Gráfico da curva granulométrica das granalhas de aço de perfil angular GH-50 nas condições " <i>nova</i> " e " <i>usada</i> "	107
Figura 50 – Amostras de aço para ensaio conforme Norma ASTM D 3164-03 (ASTM, 2003). Unidades em milímetros (mm)	108
Figura 51 - Perfilômetro óptico do Laboratório Associado de Sensores e Materiais (LAS)	110
Figura 52 - Microscópio eletrônico de varredura (MEV) da Divisão de Materiais do IAE	110
Figura 53 - Corpo de prova tipo “junta adesivada” utilizado no ensaio de cisalhamento	111
Figura 54 – Detalhe da camada de adesivo (espessura igual a 0,7 mm) no corpo de prova de cisalhamento.	111
Figura 55 - Aplicação de <i>primer</i> na superfície das amostras de aço após jateamento abrasivo e limpeza com tricloroetano	112
Figura 56 - Dispositivo de colagem	113
Figura 57 - Amostras de aço e placas de carbono fenólica preparadas para serem coladas.....	113
Figura 58 - Placas de carbono fenólica posicionadas no dispositivo de colagem. Observa-se o arame de aço inox para manter constante a espessura do filme de adesivo após a colagem.....	114
Figura 59 - Amostras de aço posicionadas para colagem.....	114

Figura 60 - Detalhe do posicionamento das amostras de aço no dispositivo de colagem.....	115
Figura 61 - Detalhe da camada de desmoldante utilizada no dispositivo de colagem.	115
Figura 62 - Detalhe do fechamento do dispositivo, de forma a pressionar a camada de cola, produzindo a espessura prevista (0,7 mm)	116
Figura 63 - Máquina de ensaio ZWICK 1474	118
Figura 64 – Fluxograma macro das etapas do experimento - Parte 1.....	119
Figura 65 - Fluxograma dos experimentos no equipamento 1 - Sequência 1A.....	120
Figura 66 - Fluxograma dos experimentos no equipamento 2 - Sequência 1B.....	120
Figura 67 - Gráfico comparativo da rugosidade média das amostras de aço após tratamento térmico	125
Figura 68 – Gráfico comparativo entre as rugosidades médias das amostras de aços 300M-ESR e Maraging 18Ni300 jateadas no equipamento 1.....	130
Figura 69 - Gráfico comparativo entre as rugosidades médias das amostras de aços 300M-ESR e Maraging 18Ni300 jateadas no equipamento 2.....	134
Figura 70 - Topografia da superfície da amostra de aço 300M-ESR (amostra 25), após tratamento térmico, realizada por perfilometria óptica.....	136
Figura 71 - Topografia da superfície da amostra de aço 300M-ESR (amostra 25), após jateamento abrasivo no equipamento 1 com granalha de aço de perfil angular GH-50, realizada por perfilometria óptica.....	136
Figura 72 - Topografia da superfície da amostra de aço Maraging 18Ni300 (amostra M20), após tratamento térmico, realizada por perfilometria óptica.....	138
Figura 73 - Topografia da superfície da amostra de aço Maraging 18Ni300 (amostra M20), após jateamento abrasivo no equipamento 1 com granalha de aço de perfil angular GH-50, realizada por perfilometria óptica.....	138

Figura 74 – Fotomicrografia. Aumento:600x . Superfície jateada da amostra de aço 300M-ESR.....	140
Figura 75 – Fotomicrografia. Aumento 600x. Superfície jateada da amostra de aço Maraging18Ni300	140
Figura 76 - Gráfico dos efeitos da vazão e do ângulo de incidência da granalha sobre a variável dependente para o aço 300M-ESR.....	141
Figura 77 - Gráfico dos efeitos da vazão e do ângulo de incidência da granalha sobre a variável dependente para o aço Maraging 18Ni300	142
Figura 78 - Gráfico dos efeitos da vazão e do ângulo de incidência da granalha sobre a variável dependente para o aço 300M-ESR.....	143
Figura 79 - Gráfico dos efeitos da vazão e do ângulo de incidência da granalha sobre a variável dependente para o aço Maraging 18Ni300	143
Figura 80 - Gráfico da influência da condição da granalha (partícula abrasiva) sobre a rugosidade superficial do aço 300M-ESR	144
Figura 81 - Gráfico da influência da condição da granalha (partícula abrasiva) sobre a rugosidade superficial do aço Maraging 18Ni300.....	145
Figura 82 - Fixação da junta adesivada no dispositivo de ensaio.	147
Figura 83 – Gráfico de intervalo de confiança para a tensão média de cisalhamento (MPa) na interface colada com substratos metálicos tratados superficialmente no equipamento 1 de jateamento	148
Figura 84 – Gráfico de intervalo de confiança para a tensão média de cisalhamento (MPa) na interface colada com substratos metálicos tratados superficialmente no equipamento 2 de jateamento	150
Figura 85 - Junta adesivada antes do ensaio de cisalhamento.....	151
Figura 86 - Falha adesiva na interface colada metal/carbono após ensaio de cisalhamento. Pode-se observar que todo o filme de adesivo ficou aderido à superfície da placa de carbono	151

Figura 87 - Gráfico representativo da tensão de ruptura na interface colada para o equipamento 1 de jateamento	153
Figura 88 - Gráfico representativo da tensão de ruptura na interface colada para o equipamento 2 de jateamento	154

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Relação de fatores de Influência e Níveis de avaliação pesquisados nos experimentos.....	87
Tabela 2 – Fatores de Influência e Níveis do processo atualmente em uso	88
Tabela 3 - Sequencia de experimentos realizados no equipamento 1	94
Tabela 4 - Sequencia de experimentos no equipamento 2	96
Tabela 5 - Composição química em massa do aço 300M-ESR	103
Tabela 6 - Composição química em massa do aço Maraging 18Ni300	104
Tabela 7 - Granalha de aço de perfil angular GH-50 na condição " <i>nova</i> "	105
Tabela 8 - Granalha de aço de perfil angular GH-50 na condição " <i>usada</i> "	106
Tabela 9 - Resultado do ensaio de dureza nas amostras de aço 300M-ESR	108
Tabela 10 - Resultado do ensaio de dureza nas amostras de aço Maraging 18Ni300	109
Tabela 11 - Valores de rugosidade Ra (μm) para amostras de aço 300M-ESR após tratamento térmico	122
Tabela 12 - Valores de rugosidade Ra (μm) para amostras de aço Maraging 18Ni300 após tratamento térmico.....	124
Tabela 13 - Condição superficial inicial das amostras de aço após a realização do tratamento térmico	126
Tabela 14 - Resultados da análise de variância da rugosidade superficial média Ra (μm) entre as amostras de aço 300M-ESR e Maraging 18Ni300.....	126
Tabela 15 - Resultado do teste de Tukey para a diferença de rugosidade média entre os aço 300M-ESR e Maraging 18Ni300	126

Tabela 16- Valores de rugosidade Ra (μm) para amostras de aço 300M-ESR jateadas no equipamento 1	127
Tabela 17 – Média dos valores de rugosidade encontrado nas amostras de aço 300M-ESR jateadas no equipamento 1	128
Tabela 18 - Valores de rugosidade Ra (μm) para amostras de aço Maraging 18Ni300 jateadas no equipamento 1	128
Tabela 19 - Média dos valores de rugosidade encontrado nas amostras de aço Maraging 18Ni300 jateadas no equipamento 1	129
Tabela 20 - Valores de rugosidade média (Ra) encontrados para os aços 300M-ESR e Maraging 300 no equipamento 1	129
Tabela 21 - Valores de rugosidade Ra (μm) para amostras de aço 300M-ESR jateadas no equipamento 2	131
Tabela 22 – Média dos valores de rugosidade encontrado nas amostras de aço 300M-ESR jateadas no equipamento 2.....	131
Tabela 23 - Valores de rugosidade Ra (μm) para amostras de aço Maraging 18Ni300 jateadas no equipamento 2	132
Tabela 24 - Média dos valores de rugosidade encontrado nas amostras de aço Maraging 18Ni300 jateadas no equipamento 2	133
Tabela 25 - Resumo dos valores de rugosidade média encontrado para os aços 300M-ESR e Maraging 18Ni300 no equipamento 2	133
Tabela 26 - Relação das amostras de aço preparadas superficialmente no equipamento 1 de jateamento e selecionadas como substrato na junta adesivada.	146
Tabela 27- Relação das amostras de aço preparadas superficialmente no equipamento 2 de jateamento e selecionadas como substrato na junta adesivada.	146

Tabela 28 - Resistência mecânica da junta adesivada com substrato em aço 300M-ESR tratado superficialmente no equipamento 1 de jateamento.....	147
Tabela 29 - Resistência mecânica da junta adesivada com substrato em aço Maraging 18Ni300 tratado superficialmente no equipamento 1 de jateamento.....	148
Tabela 30 - Resistência mecânica da junta adesivada com substrato em aço 300M-ESR tratado superficialmente no equipamento 2 de jateamento.....	149
Tabela 31 - Resistência mecânica da junta adesivada com substrato em aço Maraging 18Ni300 tratado superficialmente no equipamento 2 de jateamento.....	149
Tabela 32 - Intervalo de resistência mecânica para o processo de preparação de superfície no equipamento 1 de jateamento abrasivo	152
Tabela 33 - Intervalo de resistência mecânica para o processo de preparação de superfície no equipamento 2 de jateamento abrasivo	152

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Perfil de rugosidade em função da granulometria do abrasivo	81
Quadro 2 - Comparação entre os valores de rugosidade Ra (μm) encontrados nas amostras pelos instrumentos eletromecânico e ótico	137
Quadro 3 - Comparação da morfologia da superfície jateada das amostras.....	139

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- AAB – Associação Aeroespacial Brasileira
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AISI – American Iron and Steel Institute
- ASM – American Society for Metals
- ASME – American Society of Mechanical Engineers
- ASTM – American Society for Testing and Materials
- CLBI – Centro de Lançamento da Barreira do Inferno
- CTA- Centro Técnico Aeroespacial
- DCTA – Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial
- ESR - Electro Slag Remelting
- IAE – Instituto de Aeronáutica e Espaço
- INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- ISO – International Standards for Organization
- MEV- Microscópio Eletrônico de Varredura
- NBR – Norma Brasileira Registrada
- PNAE – Programa Nacional de Atividades Espaciais
- SAE – Society of Automotive Engineers
- SIV – Veículo de sondagem IV
- VAR – Vacuum Arc Remelting
- VLS – Veículo Lançador de Satélites

LISTA DE SÍMBOLOS

A – Área real

A_0 – Área nominal

dx - Deslocamento

E_c – Energia cinética da partícula abrasiva

K_{ic} - Tenacidade à fratura do material

L_e – Percurso de amostragem (*cut-off*)

L_m – Percurso de medição

L_n – Percurso final

L_t – Percurso de apalpamento

L_v – Percurso inicial

m – Massa da partícula abrasiva

r – Fator de rugosidade

R – Raio da partícula abrasiva

v – Velocidade da partícula abrasiva

Θ – Ângulo de contato

Θ^* – Ângulo de contato da superfície rugosa

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	26
1.1 Objetivos	29
1.2 Delimitação do trabalho	30
1.3 Justificativa.....	30
1.4 Organização do trabalho	31
2. REVISÃO DA LITERATURA	33
2.1 Histórico do Programa Espacial Brasileiro	33
2.1.1 Evolução dos aços utilizados no Programa Espacial Brasileiro	35
2.1.2 Substituição do aço 300M-ESR pelo aço Maraging 18Ni300.....	37
2.2 Aços de Ultra-Alta-Resistência.....	40
2.2.1 Aço de ultra-alta-resistência 300M-ESR	41
2.2.2 Aço de ultra-alta-resistência Maraging 18Ni300	42
2.3 Rugosidade Superficial	43
2.3.1 Topografia da superfície.....	43
2.3.1.1 Textura da superfície.....	45
2.3.1.2 Ondulação.....	46
2.3.1.3 Rugosidade: definições	47
2.3.1.3.1 Medição da rugosidade superficial.....	49
2.3.1.3.2 Sistemas de medição da rugosidade	50
2.3.1.3.3 Parâmetros de avaliação da rugosidade.....	52
2.3.1.3.3.1 Rugosidade média – Ra.....	52
2.3.1.3.3.2 Rugosidade média – Rz	54
2.3.1.3.3.3 Rugosidade máxima – Rmax; Ry e Rugosidade total – Rt	56
2.3.1.3.4 Medição da rugosidade	57
2.4 Teoria Mecânica da Adesão.....	62
2.4.1 Histórico da teoria mecânica de adesão	64

2.4.2	Influência da rugosidade da superfície.....	67
2.4.2.1	Fator rugosidade: Aumento da área de contato	67
2.4.3	Adesão específica: Aspectos termodinâmicos	68
2.4.3.1	Molhabilidade	69
2.4.3.2	Lei de Wenzel	71
2.5	Juntas Adesivadas	74
2.5.1	Aplicação de <i>primer</i>	74
2.5.2	Tipo de fratura em juntas adesivadas	75
2.6	Tratamento Superficial	76
2.6.1	Jateamento abrasivo	78
2.6.2	Granalhas de aço fundidas.....	82
3.	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	84
3.1	Planejamento dos ensaios experimentais	85
3.1.1	A unidade experimental.....	86
3.1.2	Escolha dos fatores e seus respectivos níveis	86
3.1.3	Delineamento dos experimentos.....	88
3.1.4	Variável dependente em análise.....	91
4.	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	92
4.1	Execução dos experimentos no equipamento 1 de jateamento abrasivo ...	92
4.2	Execução dos experimentos no equipamento 2 de jateamento abrasivo ...	96
4.3	Medida da rugosidade superficial.....	100
4.3.1	Calibração do rugosímetro	100
4.3.2	Medição da rugosidade superficial.....	101
5.	MATERIAIS E MÉTODOS	103
5.1	Materiais utilizados.....	103
5.1.1	Aço 300M-ESR	103
5.1.2	Aço Maraging 18Ni300	104
5.1.3	Partículas abrasivas	105

5.2	Preparação das amostras	107
5.2.1	Tratamento térmico das amostras de aço	108
5.2.2	Ensaio realizados nas amostras após jateamento abrasivo	109
5.2.2.1	Perfilometria óptica.....	109
5.2.2.2	Microscopia eletrônica.....	110
5.3	Preparação dos corpos de prova para ensaio de cisalhamento.....	111
5.3.1	Ensaio mecânico de cisalhamento.....	117
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	119
6.1	Caracterização da Superfície	121
6.1.1	Determinação da rugosidade superficial após tratamento térmico.....	121
6.1.1.1	Para o aço 300M-ESR.....	121
6.1.1.2	Para o aço Maraging 18Ni300	123
6.1.2	Determinação da rugosidade superficial após jateamento abrasivo	127
6.1.2.1	Resultados para o equipamento 1 de jateamento abrasivo	127
6.1.2.1.1	Aço 300M-ESR	127
6.1.2.1.2	Aço Maraging 18Ni300	128
6.1.2.2	Resultado para o equipamento 2 de jateamento abrasivo	130
6.1.2.2.1	Aço 300M-ESR	130
6.1.2.2.2	Aço Maraging 18Ni300	132
6.1.3	Resultado da topografia da superfície.....	135
6.1.3.1	Para o aço 300M-ESR.....	135
6.1.3.2	Para o aço Maraging 18Ni300	137
6.1.4	Resultado da morfologia da superfície jateada.....	139
6.2	Influência das Variáveis Intervenientes do processo de jateamento	141
6.2.1	Para o equipamento 1 de jateamento abrasivo	141
6.2.2	Para o equipamento 2 de jateamento abrasivo	142
6.2.3	Influência da condição da granalha.....	144

6.3	Resistência Mecânica da Interface Colada	146
6.3.1	Resultado do ensaio mecânico de cisalhamento.....	146
6.3.2	Tipo de falha ocorrida na interface colada	151
6.4	Análise dos dados do Ensaio de Cisalhamento	152
7.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	155
7.1	Conclusões	155
7.2	Sugestões para trabalhos futuros	156
8.	REFERÊNCIAS.....	157
9.	ANEXOS.....	163

1. INTRODUÇÃO

De uma forma geral, um foguete é constituído do compartimento de carga útil e do sistema de propulsão formado pelos motores foguetes. Um motor foguete típico a propelente sólido é composto por envelope motor, proteções térmicas, ignitor, tubeira e o bloco de propelente sólido. As principais funções desses componentes são:

Ignitor: É o elemento responsável pela iniciação da queima do bloco de propelente. Quando acionado, gera uma chama com a energia necessária para que toda a superfície interna do bloco inicie a queima simultaneamente.

Proteções térmicas e liner: Tem por função básica proteger termicamente o envelope motor da temperatura da ordem de 3.200K oriunda dos gases de combustão do propelente. Elas podem ser rígidas, e normalmente são aplicadas na região traseira do motor, onde a velocidade dos gases quentes é crescente e causa maior solitação térmica às superfícies expostas; ou flexíveis, as quais permitem deformações independentes entre o bloco de propelente e o envelope motor. O liner pode ser aplicado na parte interna do motor como uma manta ou curado.

Tubeira: É o elemento essencial para que a expansão dos gases da combustão do propelente seja eficiente, é onde ocorre a expansão e escape dos gases gerados na câmara de combustão, tendo a função de transformar a energia térmica dos gases em energia cinética. Ela tem em seu interior a garganta que se constitui do casamento de duas geometrias: uma convergente e outra divergente. A primeira esta voltada para o interior da câmara e tem a função de acelerar os gases até a garganta, região de diâmetro mínimo. A partir deste ponto, os gases se expandem no trecho divergente da garganta, e prosseguem em um cone, chamado divergente, até o escape pela seção de saída. A Figura 1 mostra uma tubeira de foguete típica.

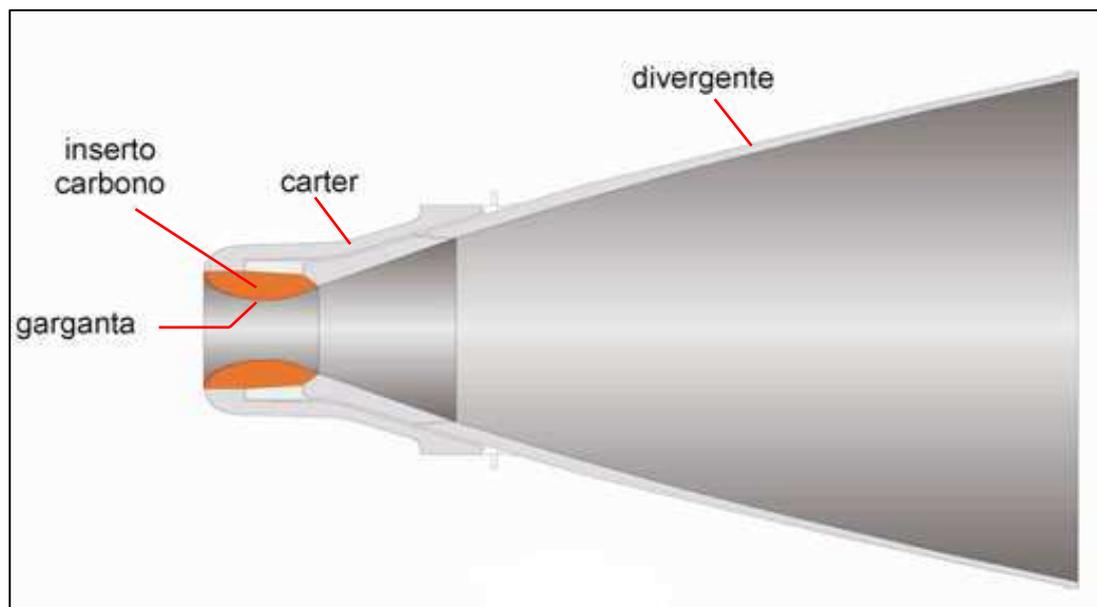


Figura 1 - Tubeira típica de um Motor Foguete (MACERA, 2008)

Envelope Motor: Tem a função de suportar a alta pressão interna que ocorre dentro da câmara de combustão. Para diminuir o peso e com isso melhorar o desempenho dos veículos, os motores são fabricados em materiais de alto desempenho mecânico, tais como: aços de ultra-alta-resistência, ligas de alumínio especiais, Titânio (Ti), materiais compósitos em carbono.

Propelente sólido: É a mistura de material redutor e oxidante que podem coexistir em estado sólido, à temperatura ambiente, em condições onde estarão intimamente misturados e aglutinados com um polímero convenientemente escolhido. A essa mistura, adicionam-se produtos específicos, como: agentes tixotrópicos, plastificantes, aceleradores ou retardadores de cura ou combustão, agente de cura e outros que fornecerão, ao produto final, não só as características energéticas, mas também as propriedades mecânicas necessárias para o propelente suportar as tensões induzidas, durante a cura, o manuseio, a armazenagem, o transporte, a ignição, a pressurização e o voo.

O Programa Espacial Brasileiro utiliza em seus foguetes sistemas propulsivos a propelentes sólidos, com envelopes motores, fabricado em aço de ultra-alta-resistência, os quais são revestidos por isolantes térmicos, também chamados de proteções térmicas e liner.

Esses isolantes térmicos são aderidos na estrutura interna do envelope motor após um processo de preparação da superfície do aço, que tem por objetivos

eliminar a camada de óxidos e preparar a superfície para receber a aderência do *primer* e materiais poliméricos específicos que funcionarão como isolantes térmicos, conforme mostrado na Figura 2.

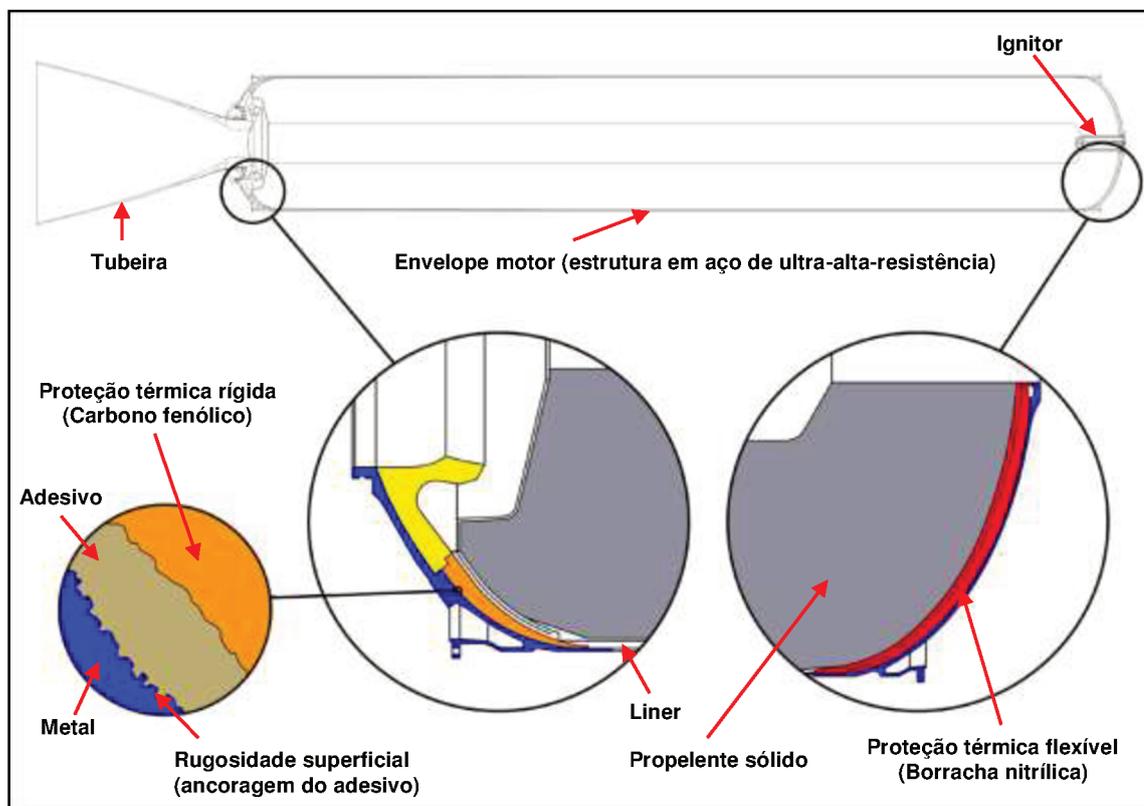


Figura 2 - Esquema de um envelope motor foguete, ilustrando os principais componentes e isolantes térmicos (proteção térmica rígida, proteção térmica flexível e liner). No detalhe menor a interface colada metal/proteção térmica rígida (Fonte: Autor)

A função principal dos isolantes térmicos é impedir que as altas temperaturas (3.200K) dos gases resultantes da queima do propelente sólido atinjam a chapa de aço da estrutura do envelope motor provocando alteração microestrutural podendo assim causar o colapso de toda a estrutura, em função da perda das propriedades mecânicas do aço devido a sua exposição às altas temperaturas. A integridade nessa região de interface (metal/isolante térmico) é que garante que todo o conjunto depois de aderido um ao outro suporte as tensões impostas durante o voo tais como: dilatações e contrações do bloco de propelente, aceleração e as vibrações mecânicas. A qualidade da adesão nessa interface é um dos itens que define a confiabilidade desse envelope motor (MORAES, et al., 2005).

O processo de preparação da superfície metálica, utilizada como substrato, através de tratamento superficial mecânico de jateamento abrasivo é a primeira

etapa do processo de aderência de isolantes térmicos, e tem por objetivos, além da remoção da camada de óxidos, a produção de um padrão de ancoragem (macrorrugosidades) adequado entre as superfícies, de fundamental importância para se atingir o nível de resistência adesiva desejada.

Por sua natureza, a área espacial exige alto desempenho de seus componentes e alta confiabilidade. O processo de colagem de isolantes térmicos pode ser considerado como um processo “especial”, isto é, seus resultados são verificáveis somente ao seu final, não havendo possibilidade de avaliação parcial do resultado do produto e de intervenção no processamento do mesmo (SAKAI, et al., 2006).

Em se tratando de adesivos, a aderência está diretamente ligada à preparação da superfície do substrato e a qualidade da ligação adesiva é proporcional ao tratamento superficial utilizado, o que possibilita aumentar a tensão superficial do substrato, incrementar a rugosidade da superfície (área de contato) e as trocas químicas na superfície do substrato (LIMAVERDE, et al., 2006). Segundo a teoria mecânica de adesão, a rugosidade permite a penetração do adesivo nas irregularidades das superfícies, depositando-se nos vales entre os picos do substrato e promovendo desta forma o “*ancoramento*” entre as mesmas (LIMAVERDE, et al., 2006).

Em razão da importância da interface metal/isolante térmico no desempenho dos envelopes motores e da necessidade de substituição do aço utilizado atualmente na fabricação de envelopes motores, faz-se necessário a determinação de resultados no processo de preparação da superfície para a colagem de isolantes térmicos, uma vez que, embora esteja ocorrendo a substituição do aço, os equipamentos e procedimentos empregados continuarão, a princípio, a serem os mesmos. É necessário avaliar se os parâmetros do processo atualmente empregados serão suficientes para manter a mesma resistência mecânica na interface colada após a substituição para o novo material.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo geral avaliar o processo atual de preparação de superfície para aderência de isolantes térmicos em envelopes motores de 1.000 mm de diâmetro, visando sua utilização no aço Maraging 18Ni300, tendo como parâmetros de comparação a rugosidade superficial e a resistência mecânica

adesiva obtida atualmente na interface colada metal/isolante térmico do aço 300M-ESR.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Verificar o nível máximo de rugosidade alcançada nas superfícies dos aços 300M-ESR e Maraging18Ni300 pelo processo atual de preparação de superfície;
- Analisar a influência dos principais parâmetros do processo de tratamento superficial de jateamento abrasivo sobre a rugosidade superficial; e
- Comparar o desempenho dos dois aços estudados (300M-ESR e Maraging 18Ni300) em relação à resistência mecânica adesiva na interface colada metal/isolante térmico.

1.2 Delimitação do trabalho

A parte experimental executada neste trabalho limitou-se ao processo atual de preparação da superfície dos aços 300M-ESR e Maraging 18Ni300, investigando a influência da rugosidade superficial, obtida pelo tratamento superficial de jateamento abrasivo, sobre a resistência mecânica adesiva da interface colada metal/isolante térmico.

1.3 Justificativa

O aço Maraging 18Ni300 apresenta vantagens técnicas e comerciais (páginas 38 e 42) sobre o aço 300M-ESR, porém sua utilização obriga a se fazer uma reavaliação de todo o procedimento construtivo. Os processos atualmente empregados devem ser reavaliados e, se necessário, novos parâmetros para os principais processos envolvidos nas diversas fases da fabricação, principalmente para os chamados "*processos especiais*", devem ser introduzidos ou ajustados.

No processo de colagem de isolantes térmicos no interior de envelope motores, em razão de sua importância para o desempenho de todo o foguete, é muito importante o conhecimento do padrão de ancoragem (perfil da rugosidade superficial) obtido no substrato, uma vez que está diretamente associado com o nível da resistência mecânica alcançado pela interface colada metal/isolante térmico. Para o aço 300M-ESR existe um processo já qualificado. Embora não se tenha um valor numérico definido para o padrão de ancoragem, é possível dizer que o

processo atualmente empregado consegue a repetibilidade do perfil de rugosidade por estar baseado na utilização de boas práticas (repetição do processo utilizando-se mesmo equipamento e parâmetros, executados sempre por um operador experimentado) já testadas anteriormente e que tem fornecido bons resultados de resistência mecânica na interface colada.

Com a substituição do aço 300M-ESR pelo aço Maraging 18Ni300 faz-se necessário investigar se o padrão de ancoragem produzido na superfície, pelo processo atual, é capaz de alcançar para o aço Maraging 18Ni300 um nível de resistência mecânica na interface colada, compatível com a obtida atualmente para o aço 300M-ESR.

1.4 Organização do trabalho

Este trabalho está estruturado da seguinte maneira:

O Capítulo 2 apresenta a revisão da literatura contendo um histórico do Programa Espacial Brasileiro e de seus principais projetos, bem como a evolução dos aços utilizados e as razões atuais para a substituição do aço empregado nos envelopes motores do principal projeto da área aeroespacial (VLS1) em desenvolvimento no país. Também é feita referências aos aços de ultra-alta-resistência envolvidos na pesquisa, aos parâmetros atuais de avaliação da rugosidade superficial e sua importância no mecanismo de adesão e a importância do tratamento superficial mecânico de jateamento abrasivo na obtenção de um padrão de rugosidade superficial adequado à aderência de isolantes térmicos.

O Capítulo 3 apresenta um detalhamento do planejamento dos ensaios experimentais com o objetivo de possibilitar que os resultados obtidos possam ser analisados através de métodos estatísticos, permitindo a elaboração de conclusões objetivas, além de minimizar o número de ensaios a serem realizados e maximizar a quantidade de informações extraídas. Serão definidas as variáveis intervenientes do processo a serem ensaiadas, bem como as faixas de valores que serão avaliadas e as regras que associarão os experimentos realizados a cada combinação entre as faixas de valores (níveis) com as variáveis intervenientes envolvidas (fatores de influência). Também será definida a variável de resposta, de modo que garanta a objetividade dos resultados obtidos.

O Capítulo 4 faz uma descrição da execução dos experimentos nos dois equipamentos de tratamento superficial de jateamento abrasivo a seco com granalha de aço de perfil angular utilizados para preparar a superfície para aderência de isolantes térmicos.

O Capítulo 5 apresenta a caracterização dos materiais e a descrição dos ensaios realizados no presente trabalho, bem como a composição química dos aços utilizados nas amostras e a curva granulométrica das partículas abrasivas utilizadas nos tratamentos superficiais de jateamento abrasivo. Também é detalhada a metodologia adotada na fabricação das amostras para jateamento abrasivo e a metodologia usada para fabricação das juntas adesivadas utilizadas como corpos de prova no ensaio de cisalhamento.

O Capítulo 6 apresenta os resultados e a discussão referentes aos experimentos e ensaios realizados nas amostras de aço preparadas superficialmente nos dois equipamentos de jateamento disponíveis para essa função.

O Capítulo 7 finaliza a dissertação, com a apresentação das conclusões apontadas ao longo do trabalho desenvolvido e as sugestões de para trabalhos futuros.

Por fim são apresentadas as referências bibliográficas e anexos.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Histórico do Programa Espacial Brasileiro

A partir dos primeiros sucessos dos programas espaciais soviético e americano ao final da década de 50, diversos países começaram a organizar atividades voltadas à exploração do espaço exterior. Estas atividades incluíam programas de interesse científico, de pesquisa e desenvolvimento de sistemas e tecnologias espaciais e, posteriormente, de exploração de serviços e produtos decorrentes dessas novas tecnologias na solução de problemas cotidianos da humanidade. O Brasil foi um dos primeiros países em desenvolvimento a executar atividades espaciais de forma institucionalizada, tendo estabelecido organizações governamentais já no início da década de 60 (PNAE, 1998).

Em 1967 foi lançado o primeiro protótipo do veículo de sondagem Sonda I a partir do CLBI (Centro de Lançamento da Barreira do Inferno), em Natal – RN (AAB, 2006). A filosofia do Programa Espacial Brasileiro, desenvolvido pelo Departamento de Ciências e Tecnologia Aeroespacial (DCTA), antigo Centro Técnico Aeroespacial (CTA), sempre se pautou pelo desenvolvimento tecno-científico das diversas áreas necessárias às produções de peças e componentes aeroespaciais, bem como pela autossuficiência em nível de país, fomentando o desenvolvimento e a aplicação de produtos nacionais, visando eliminar a dependência de materiais e de componentes importados. Como exemplos podem ser citados o desenvolvimento de novas ligas metálicas, de revestimentos especiais de borracha, fibras, tecidos e proteções térmicas de carbono especialmente desenvolvidas para suportarem a combustão do propelente.

É sabido que o aumento do potencial tecnológico de uma nação, pela difusão de uma tecnologia caracterizada por sua complexidade e alta confiabilidade, colabora sensivelmente para a melhoria da qualidade da indústria. Criam-se condições de competitividade para os produtos no mercado externo, além de possibilitar a diminuição de parte das importações destinadas aos setores estratégicos da economia, onde é conveniente a eliminação da dependência externa. Dentre as diversas áreas de Pesquisa e Desenvolvimento, uma das que vem incorporando quantidade significativa de benefícios à humanidade é, certamente, a espacial. Talvez, a mais importante e contínua contribuição da atividade espacial seja o acréscimo da cultura tecnológica advindo da formação e especialização técnica e

científica dos recursos humanos em todos os níveis da indústria, envolvidas em programas desta natureza (ANAZAWA, 2007).

O Programa Espacial Brasileiro teve como primeiro grande desafio o desenvolvimento de sistemas propulsivos a propelentes sólidos. Escolha esta que foi fundamentada principalmente nos custos de investimentos, substancialmente mais baixos, quando comparados com os dos sistemas propulsivos a propelentes líquidos, estes de maior complexidade tecnológica e sujeitos a normas de segurança bastante rígidas e limitativas, tanto no que concerne à produção e manipulação dos propelentes, quanto à infraestrutura em terra.

Essa opção impôs que fossem desenvolvidas estruturas metálicas para alojar os blocos de propelentes sólidos, constituindo-se no corpo do foguete. Essas estruturas receberam o nome de envelopes motores, em virtude de serem projetadas e otimizadas para minimização de sua massa, que se constituem em peso morto do sistema propulsivo (BOSCOV, 1996).

Para que se obtenha a minimização do peso morto do propulsor, faz-se necessário o emprego de ligas metálicas que permitam preencher uma série de parâmetros de engenharia.

Atingir todos esses parâmetros em uma única liga metálica é praticamente inviável. Isso fez com que fossem desenvolvidos aços para uso aeronáutico e espacial que pudessem associar principalmente elevada resistência específica (relação resistência/peso), alta resistência mecânica à fadiga, boa soldabilidade e tenacidade à fratura após realização de tratamentos térmicos de têmpera e revenimento.

No início do Programa Espacial, o Departamento de Ciências e Tecnologia Aeroespacial (DCTA), antigo Centro Técnico Aeroespacial (CTA), defrontou-se com dois problemas envolvendo o projeto dos envelopes motores: que liga metálica empregar e como realizar seu tratamento térmico, que é regido por parâmetros bem definidos para cada tipo de liga (ANAZAWA, 2007).

Atualmente, o Veículo Lançador de Satélites (VLS1) que faz parte do Programa Espacial Brasileiro, utiliza chapas de aço de ultra-alta-resistência 300M-ESR, laminadas a quente, com espessura de 3,5 mm, para a fabricação de seus envelopes motores.

2.1.1 Evolução dos aços utilizados no Programa Espacial Brasileiro

Historicamente os aços utilizados para a fabricação de envelopes motores foram sendo substituídos à medida que o diâmetro dos propulsores aumentava, exigindo propriedades mecânicas mais elevadas em função da queima de um volume maior de propelente sólido.

Na primeira fase do Programa Espacial que compreende o período de 1968 a 1976 foram desenvolvidos veículos de sondagens (Sonda II e Sonda III), sem sistema de controle de altitude, utilizando envelopes motores com dimensões de 300 mm e 557 mm de diâmetros, fabricados em aço AISI/SAE 4140, produzido pelo processo VAR (refusão a arco sob vácuo), temperado e revenido para um nível de resistência à tração de 1.000,0 MPa e um valor de tenacidade à fratura (K_{Ic}) de 110,0 MPa.m^{0,5} (BOSCOV, et al., 1985).

A partir de 1976 teve início o projeto do veículo de sondagem Sonda IV, um foguete bi-estágio com dois propulsores de combustível sólido dotado de um sistema de controle de altitude nos três eixos. Para o desenvolvimento do veículo Sonda IV foi necessário o desenvolvimento de novos envelopes motores com dimensões de 557 mm e 1.000 mm de diâmetros, fabricados em aço 300M-ESR, produzido pelo processo ESR (refusão sob escória eletrocondutora), temperado e revenido para um nível de resistência à tração de 1.850,0 MPa e um valor de tenacidade à fratura (K_{Ic}) de 73,0 MPa.m^{0,5}. O veículo de sondagem Sonda IV fez seu primeiro voo em 21 de Novembro de 1984.

A utilização de aços de ultra-alta-resistência é necessária para obter-se uma significativa redução de peso nos envelopes motores sem prejuízo das propriedades mecânicas. Segundo a literatura do professor Vicente Chiaverini da USP (1987) são considerados aços de ultra-alta-resistência aqueles que possuem um limite de escoamento à tração superior a 1.400,0 MPa, embora a designação ultra-resistência seja arbitrária, porque nenhum nível de tensão aceito universalmente foi estabelecido para o termo.

A filosofia básica do Programa Espacial Brasileiro tem sido a de usar o envelope motor desenvolvido e qualificado como estágio superior (2º ou 3º estágio) no próximo projeto de foguete (BOSCOV, et al., 1985). Dentro dessa filosofia o envelope motor de 1.000 mm de diâmetro (existe atualmente em duas versões: S40

e S43), fabricado em aço 300M-ESR, e que teve o seu início de desenvolvimento no projeto Sonda IV, é hoje a base do projeto VLS1.

Os aços para uso aeroespacial devem possuir características tais como elevada resistência específica (relação resistência/peso), resistência à fadiga, tenacidade à fratura e soldabilidade aceitável (MOREIRA, 1997). São estabelecidos rigorosos requisitos para o atendimento dessas propriedades que compreendem o controle da concentração de elementos residuais, quantidade e tipo de inclusões, homogeneidade da composição química e microestrutura metalúrgica, o que torna indispensável o uso de processos como ESR (refusão sob escória eletrocondutora) e VAR (refusão a arco sob vácuo) (SILVA, et al., 1988).

Peso e resistência continuam sendo as palavras chaves para a construção de envelopes motores foguetes, buscando-se através do desenvolvimento tecnológico materiais que sejam mais leves e mais resistentes, para permitirem uma maior capacidade de transporte de carga e ao mesmo tempo suportem todas as forças impostas ao foguete durante o lançamento, o que vem forçando a busca e o desenvolvimento de novos materiais metálicos e compósitos, bem como, o desenvolvimento de novos processos que permitam a integração conjunta desses materiais.

A Figura 3 mostra a evolução dos projetos e materiais utilizados pelo Programa Espacial Brasileiro.

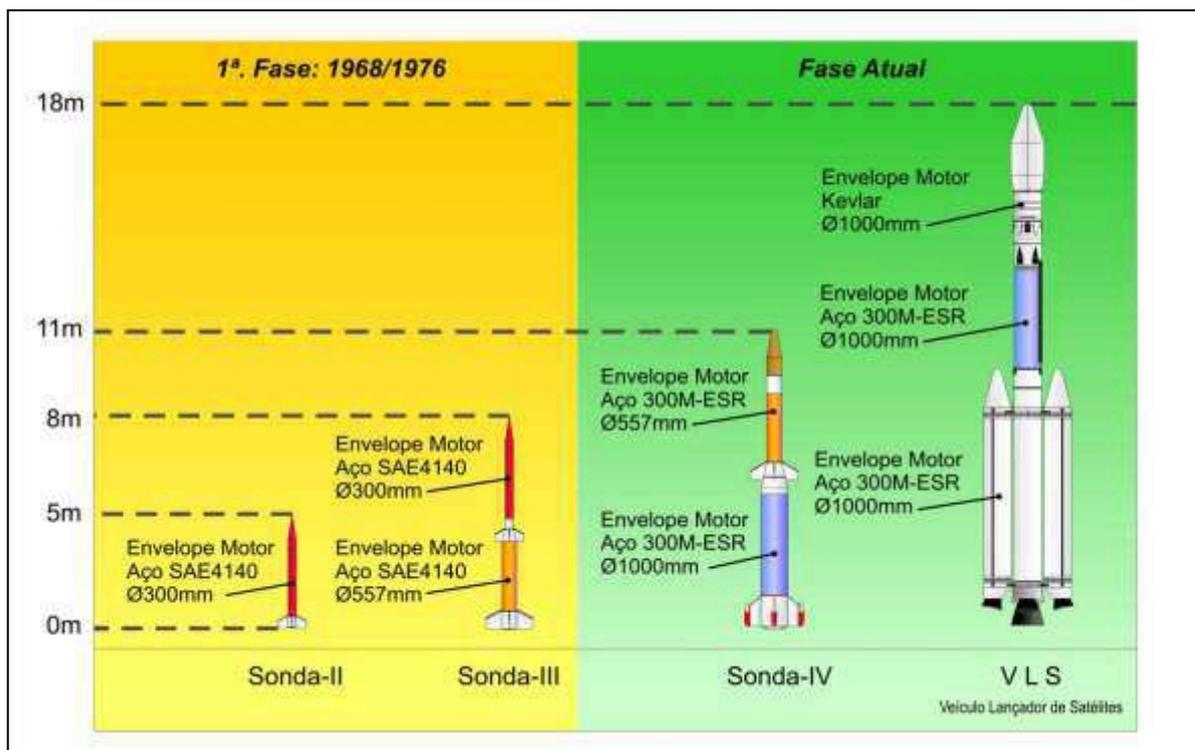


Figura 3 - Evolução dos projetos e materiais utilizados pelo Programa Espacial Brasileiro (BOSCOV, et al., 1985)

2.1.2 Substituição do aço 300M-ESR pelo aço Maraging 18Ni300

Envelopes motores S40 e S43 são fabricados em aço de ultra-alta-resistência 300M-ESR e possuem um diâmetro externo nominal de 1.007 mm e comprimento total próximo de 4.013 mm e 6.514 mm, respectivamente (SAKAI, et al., 2006).

A realização do tratamento térmico desses envelopes motores constitui um capítulo à parte, devido às dimensões dos mesmos e a relativa complexidade do ciclo térmico a ser executado para que se consiga atingir os parâmetros de resistência especificados em projeto (limite de resistência à tração de $1.850,0 \pm 50,0$ MPa e tenacidade estimada pela relação $\sigma_{re}/\sigma_r > 1$, onde σ_{re} é o limite de resistência do corpo de prova de tração entalhado e σ_r , sem entalhe). Atualmente o principal problema no que diz respeito ao emprego do aço 300M-ESR na fabricação de envelopes motores de 1.000 mm de diâmetro é devido ao elevado custo para a realização de seu ciclo de tratamento térmico em forno tipo poço com atmosfera controlada e têmpera interrompida em banho de sal fundido a 200°C, em peças de formato tubular com as dimensões acima e espessura de chapa de 3,5 mm, além das dificuldades encontradas para as correções das deformações residuais decorrentes da realização do ciclo térmico.

Deformações nos envelopes motores têm reflexo nas funções principais do produto e restritivas como características propulsivas, ou seja, na integração com outros envelopes motores e subsistemas, dinâmica de voo, estrutural e segurança (SAKAI, et al., 2006).

As dificuldades de tratamento térmico do aço 300M-ESR já haviam sido discutidas no final da década de 70, quando o Programa Espacial ainda definia os requisitos técnicos a serem utilizados no projeto VLS1, porém, a outra opção que seria a fabricação em aço Maraging 18Ni300 tinha como obstáculos o seu elevado custo de produção, de cinco a dez vezes maior que o do aço 300M-ESR, a utilização de altos teores de níquel (Ni) e cobalto (Co), à época tido como material estratégico e de difícil importação por nossas siderúrgicas, assim como a alta pureza de sua composição química (BOSCOV, et al., 1985). Essas ligas possuem baixos teores de carbono e classicamente contêm 18% de níquel (Ni), 9% de cobalto (Co), 5% de molibdênio (Mo) e 0,7% de titânio (Ti).

A alta resistência desses aços é atingida quando estes são envelhecidos na faixa de 400 a 500°C, onde ocorre a precipitação de compostos intermetálicos. Também, no que concerne à laminação do aço Maraging as taxas de deformação por temperatura são bastante restritivas, fazendo com que a qualidade dos laminados dependa dos parâmetros de laminação, sem possibilidades posteriores de recuperação da qualidade do material mediante tratamentos térmicos corretivos. Praticamente era impossível para as condições técnicas daquela época a fabricação industrial de chapas laminadas de aço Maraging no país, pelo menos em curto prazo, tendo que recorrer constantemente à importação de chapas no exterior, criando-se assim uma dependência externa que contrariava a filosofia do Programa Espacial Brasileiro.

Isto posto, considerando-se que o país já dominava completamente a produção industrial do aço AISI/SAE 4340, optou-se assim pelo aço 300M-ESR, apesar de o aço Maraging 18Ni300 revelar diversas vantagens em relação ao aço 300M-ESR, quando comparadas as suas propriedades mecânicas, estabilidade dimensional, menor tendência de concentração de tensões residuais, menor susceptibilidade a trincas de solda, melhor tenacidade à fratura da junta soldada e da zona termicamente afetada (ZTA), com menores custos dos processos de soldagem e ciclos de tratamento térmico, bem como menores temperaturas, não necessitando controle da atmosfera do forno, podendo ser tratado em forno horizontal, além da

utilização de chapas com menores espessuras, reduzindo dessa maneira, o peso da estrutura final.

Atualmente, as restrições que impediram a escolha do aço Maraging no passado como material para a fabricação dos envelopes motores de 1.000 mm de diâmetro não existem mais. Hoje, com a evolução tecnológica de seus equipamentos e processos, a Villares Metals em Sumaré-SP tem plenas condições de produzir sob encomenda para o DCTA/IAE, as placas de aço Maraging 18Ni300 com as especificações técnicas necessárias para serem utilizadas na fabricação de envelopes motores, eliminando assim, o principal obstáculo que impedia a utilização desse aço nos envelopes motores, que residia na dependência externa de um fornecedor para esse material.

Por outro lado, os problemas com o tratamento térmico do aço 300M-ESR ao longo dos últimos anos somente se agravaram, além das deformações que são inerentes ao processo de tratamento térmico, os custos para manter em operação o sistema de fornos e equipamentos responsável pela realização do ciclo térmico tiveram um aumento expressivo em razão da legislação ambiental, que tornou o sal utilizado na operação de martêmpera (120 toneladas) e seus resíduos (água contaminada com resíduos de sal provenientes da limpeza dos envelopes motores após a realização da martêmpera) como perigosos – classe I, conforme norma NBR 10004.

Além desse processo de tratamento térmico ser oneroso, existe ainda o risco, mesmo em se tomando todas as precauções e medidas de segurança necessárias, de um incidente com o banho de sal fundido ou com o efluente do tanque de limpeza por imersão, seja por um acidente durante a operação de tratamento térmico, ou por qualquer outro tipo de sinistro alheio às atividades do tratamento térmico, acarretando além de multas, danos consideráveis ao meio-ambiente.

2.2 Aços de Ultra-Alta-Resistência

Aços estruturais com resistência muito elevada são frequentemente referenciados como sendo aços de ultra-alta-resistência. A designação “ultra-alta-resistência” é arbitrária porque não é de aceitação universal, entretanto, o uso desse termo tem-se acentuado. Porém, com o contínuo desenvolvimento dos aços estruturais com alta e muita alta resistência, a faixa de resistência para a qual o termo se adéqua tem sido gradualmente alterada (ASM, 1990).

Atualmente, recebem esta designação os aços estruturais que apresentam um limite de escoamento de no mínimo 1.380 MPa, por meio de tratamento térmico ou mecânico, sendo que, atualmente centenas de aços liga podem receber esta designação (ASM, 1990).

Nos últimos 20 anos muita atenção tem sido dada ao desenvolvimento dos aços de ultra-alta-resistência devido à necessidade do uso desses aços em aplicações especiais, tais como as da indústria aeronáutica, aeroespacial e material bélico, ampliando consideravelmente o campo de utilização dos aços de ultra-alta-resistência. Os aços de ultra-alta-resistência são utilizados em componentes críticos de aeronaves, como por exemplo, em trens de pouso, vasos de pressão, estrutura de mísseis e envelopes motores de foguetes (SUAREZ, 1990). Os aços de ultra-alta-resistência podem ser enquadrados dentro das seguintes categorias (TOMITA, 1991 apud SANTOS, 2001).

- Aços de baixa liga (AISI 4340 e 300M-ESR);
- Aços de alta liga com endurecimento secundário (AISI HY 180, AF 1410, HP 9-4-20 e HP 9-4-30);
- Aços endurecidos por precipitação (AISI 15-5PH e PH 13-8); e
- Aços Maraging (de grau 200, 250, 300, 350)

Se o principal requisito de seleção é a resistência à tração, os aços de baixa liga devem ser utilizados em preferência a outros aços de ultra-alta-resistência.

Os aços de ultra-alta-resistência de baixa liga são de médio teor de carbono (0,25 a 0,50 % C) e contém quantidades variáveis de cromo (Cr), molibdênio (Mo), níquel (Ni), silício (Si) e vanádio (V). Entretanto, os aços de baixa liga de uso comercial normalmente tem seu uso limitado devido aos baixos valores de tenacidade à fratura (TOMITA, 1991 apud SANTOS, 2001).

Até 1940, a máxima resistência à tração obtida em um aço temperado e revenido era da ordem de 1.230 MPa, posteriormente, o melhor entendimento da cinética metalúrgica e a adição adequada de elementos de liga possibilitaram, através de tratamentos térmicos convencionais, o surgimento de aços com limite de resistência à tração da ordem de 2.200 MPa. Atualmente, é possível obter aços com resistência à tração muito elevada, da ordem de 3.000 MPa (ASM, 1990).

Embora exista uma gama enorme de aços de ultra-alta-resistência, o presente trabalho utiliza para pesquisa os aços 300M-ESR e Maraging 18Ni300 os quais serão melhor detalhados, quanto às suas propriedades mecânicas e processos de fabricação.

2.2.1 Aço de ultra-alta-resistência 300M-ESR

Por possuir um alto desempenho associado a um elevado grau de confiabilidade, exigido pelo Programa Espacial Brasileiro, foi selecionado o aço de ultra-alta-resistência 300M-ESR, com a finalidade de fabricar, principalmente, envelopes motores.

O aço de ultra-alta-resistência 300M-ESR difere do aço AISI/SAE 4340 por um alto teor de Silício (Si), teores de Carbono (C) e Molibdênio (Mo) ligeiramente maiores, com adição de Vanádio (V). Este aço apresenta, como características principais, alta profundidade de têmpera e mantém certa ductilidade e tenacidade a limites de resistência à tração de 1.860 a 2.070 MPa (ANAZAWA, 2007).

Muitas das propriedades deste aço são similares às do aço AISI/SAE 4340, exceto o teor de Silício (Si) que proporciona uma maior profundidade de têmpera (retardamento das transformações austeníticas), um aumento no endurecimento por solução sólida e uma melhor resistência mecânica a altas temperaturas (SANTOS, 2001).

O desenvolvimento do aço 300M-ESR no país deveu-se em grande parte ao progresso do parque siderúrgico nacional que, através do DCTA (Departamento de Ciências e Tecnologia Aeroespacial), antigo Centro Técnico Aeroespacial (CTA) e da ELETROMETAL, atual VILLARES METALS, conseguiram colocar no mercado matéria-prima de excepcional qualidade (LOPES, et al., 1982).

A alta qualidade dessa liga metálica somente foi possível graças à utilização do processo ESR (Electro Slag Remelting) em que o material produzido possui alto grau de homogeneidade de estrutura e ausência de macroinclusões.

2.2.2 Aço de ultra-alta-resistência Maraging 18Ni300

Os aços Maraging pertencem a uma classe de aços de ultra-alta-resistência que diferem da maioria dos aços pelo mecanismo de endurecimento. Enquanto nos aços convencionais o endurecimento é obtido por transformação martensítica, nos aços Maraging ocorre uma reação metalúrgica que não envolve carbono, sendo o aumento das propriedades mecânicas obtido pela precipitação de compostos intermetálicos em temperatura na ordem de 480°C

O nome Maraging deriva de MARTENSITA+ AGE HARDENING, oriundo do endurecimento por envelhecimento de uma matriz martensítica de baixo teor de Carbono (C). As ligas comerciais desse tipo de aço contêm altos teores de Níquel (Ni), Cobalto (Co) e Molibdênio (Mo), além de adições de Titânio (Ti) e Alumínio (Al).

A ausência de Carbono (C) e o mecanismo de endurecimento por precipitação conferem a esses aços uma série de vantagens (SANTOS, 2001):

- Sua variação dimensional é mínima, facilitando a fabricação de peças complexas endurecidas somente após a usinagem final;
- Possui excelente soldabilidade em decorrência do baixo teor de carbono;
- A tenacidade à fratura e a ductilidade são superiores às dos aços de ultra-alta-resistência convencionais, sendo os tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento relativamente simples, sem riscos de descarbonetação

Os principais tipos comerciais de aços Maraging são designados para atingirem níveis de limite de escoamento entre 1.030 MPa até 2.420 MPa. (Maraging 150, 200, 250, 300 e 350). São utilizados em grande variedade de aplicações incluindo mísseis, peças de aeronaves, peças hidráulicas, parafusos, punções, matrizes e envelope motor foguete.

Sua principal vantagem reside na combinação da alta relação resistência/peso, boa tenacidade à fratura aliada à sua boa soldabilidade adquirindo aumento de resistência mecânica com um simples tratamento térmico a baixa temperatura.

2.3 Rugosidade Superficial

Estamos acostumados à ideia de que os materiais têm propriedades intrínsecas, como a densidade, a condutividade elétrica e o módulo de elasticidade. As superfícies, que representam os limites dos materiais, têm propriedades talvez um pouco mais irreais, mas ainda assim, uma propriedade intrínseca, tanto quanto a cor (THOMAS, 1999).

Existem outras propriedades, no entanto, que são de fácil definição, mas cujo valor depende principalmente da técnica ou da escala de medição como, por exemplo, a dureza.

Rugosidade parece ser uma dessas propriedades, com a dificuldade adicional de que nem sempre é tão fácil de defini-la como um conceito (THOMAS, 1999).

2.3.1 Topografia da superfície

Segundo a norma ASME B46.1-1996 (ASME, 1996), a topografia da superfície é a representação tridimensional das irregularidades da superfície geométrica. A superfície geométrica pode ser definida como a superfície ideal prescrita no projeto, na qual não existem erros de forma e acabamento. Na realidade, esse tipo de superfície não existe, é empregada apenas como uma referência.

As superfícies sólidas, independentemente do seu método de formação, contêm irregularidades ou desvios de forma chamados geométricos (THOMAS, 1999).

As superfícies contêm irregularidades de várias ordens que vão desde desvios de contorno às irregularidades da ordem de distâncias interatômicas. Nenhum método de usinagem, por mais preciso que seja, pode produzir uma superfície molecularmente plana em materiais convencionais. Mesmo as superfícies extremamente lisas, tais como as obtidas por clivagem de alguns cristais, contêm irregularidades em alturas que excedem as distâncias interatômicas (BHUSHAN, 2001).

Para Morton (MORTON, 1991) a topografia de uma superfície pode ser representada ao se avaliar o conjunto rugosidade, ondulação, orientação de marcas oriundas de processos de fabricação e as falhas, conforme ilustração da Figura 4.

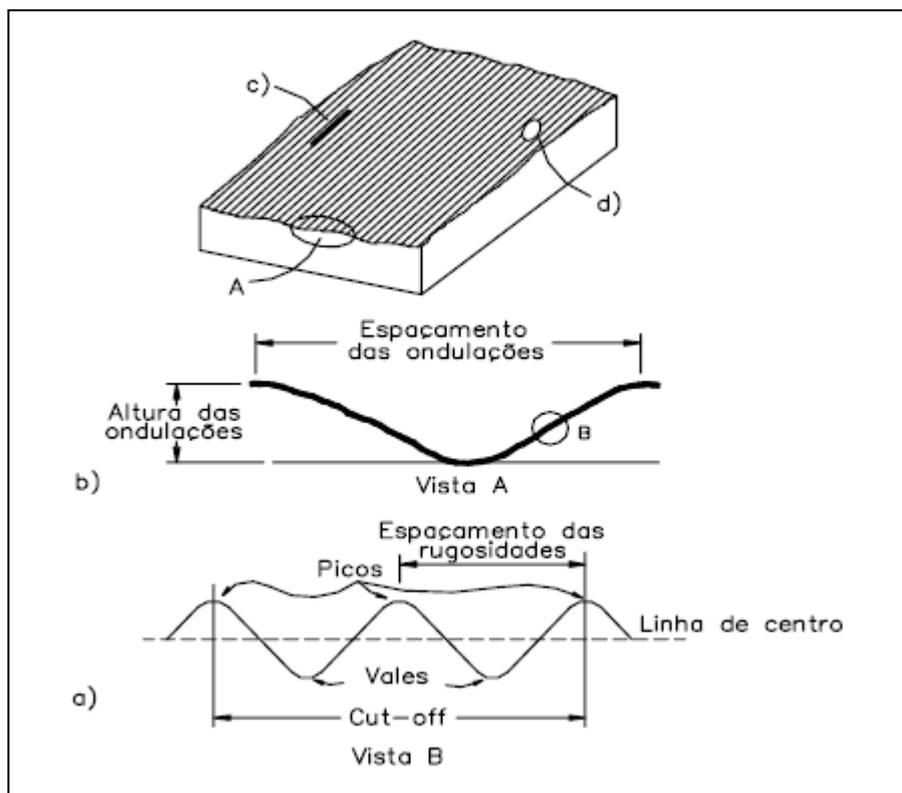


Figura 4 - Elementos da topografia da superfície: a) rugosidade superficial; b) ondulações; c) marcas denotando direções das irregularidades; d) falhas (ASME, 1996)

A razão principal para se medir a rugosidade de uma superfície é a necessidade de prever o desempenho de componentes. Como exemplo, uma superfície de apoio exige um nível de textura de superfície que permita ao lubrificante ser mantido em pequenas poças e, ao mesmo tempo, deve permitir o rolamento de componentes com um mínimo de atrito. Se a superfície for muito áspera, o desgaste pode ocorrer rapidamente; no entanto, se a superfície for muito lisa, a lubrificação será inadequada e o travamento do componente poderá ocorrer (MORTON, 1991).

A outra razão para se medir a rugosidade de uma superfície é o controle do processo de fabricação. Ao medir a topografia da superfície durante um processo, o operador pode detectar mudanças na superfície e ajustá-lo para garantir que o processo permaneça dentro dos limites especificados. Os diferentes tipos de processos de fabricação ou de remoção de material têm um grande impacto na geometria da superfície. Diversas superfícies têm espaçamentos regulares ou irregulares que tendem a descrever padrões na superfície. Esses padrões são gerados pela combinação de diversos fatores, que estão diretamente relacionados ao processo de fabricação ou ao material da peça acabada (MORTON, 1991). Dos fatores devidos ao material do componente, o mais importante é a microestrutura.

Quanto aos fatores devidos ao processo de fabricação, no caso de operações de usinagem, por exemplo, é a ferramenta de corte quem tem a maior influência na textura da superfície (FIELD, et al., 1991).

2.3.1.1 Textura da superfície

Existem diferentes definições na literatura para os elementos que compõem a textura da superfície, as principais são:

- Norma ASME B46.1-1996 (1996)

Define a textura da superfície como sendo a combinação de certos desvios repetitivos ou aleatórios da superfície real em relação à superfície geométrica, a qual compõe a superfície topográfica tridimensional.

- Whitehouse (1994)

Os desvios geométricos da superfície nominal podem ser identificados através de três tipos de irregularidades superficiais: irregularidades superficiais, conhecidas como rugosidade; irregularidades superficiais periódicas, sob a forma de ondulações superficiais e superfície não planar (orientação das marcas da ferramenta na superfície), ressaltando que algumas texturas da superfície incluem somente a rugosidade e a ondulação, enquanto outras consideram também a direção das marcas da ferramenta como ilustrado na Figura 5.

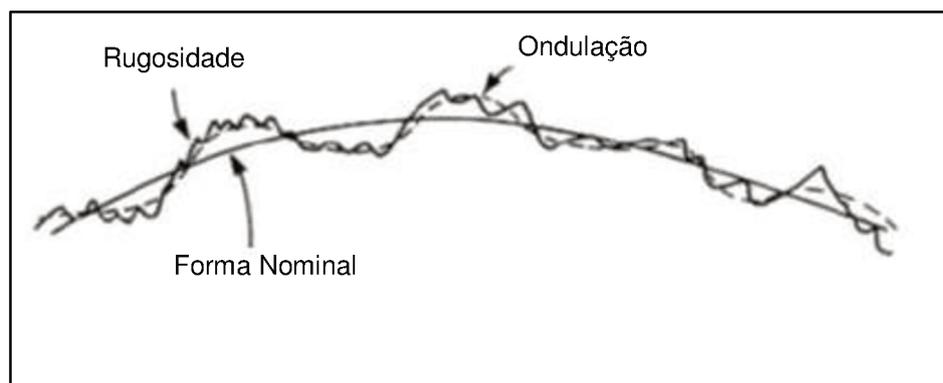


Figura 5 – Elementos que compõem a textura de uma superfície (WHITEHOUSE, 2003)

- Song, et al.(1991)

Afirma que o termo “*textura superficial*” faz referência às finas irregularidades (picos e vales) produzidas nas superfícies durante o processo de fabricação e por convenção é composta por dois componentes: rugosidade e ondulação.

De um modo em geral, as texturas das superfícies são altamente complexas, pois muitos processos de fabricação tais como: polimento, lixamento e jateamento, produzem superfícies que são de natureza estatística. Geralmente não é feita uma diferenciação dos termos “*topografia*”, “*textura superficial*” e “*rugosidade*”, o que se deve ao fato de que, dos elementos que descrevem a topografia de uma superfície, a rugosidade é especificada e avaliada com mais frequência.

A caracterização da superfície, a natureza e a medida das superfícies não podem ser separadas uma das outras. A caracterização significa dividir a geometria da superfície em seus componentes básicos.

A Figura 6 representa um perfil efetivo de uma superfície, mostrando os elementos que compõem a textura superficial quando a superfície é decomposta.

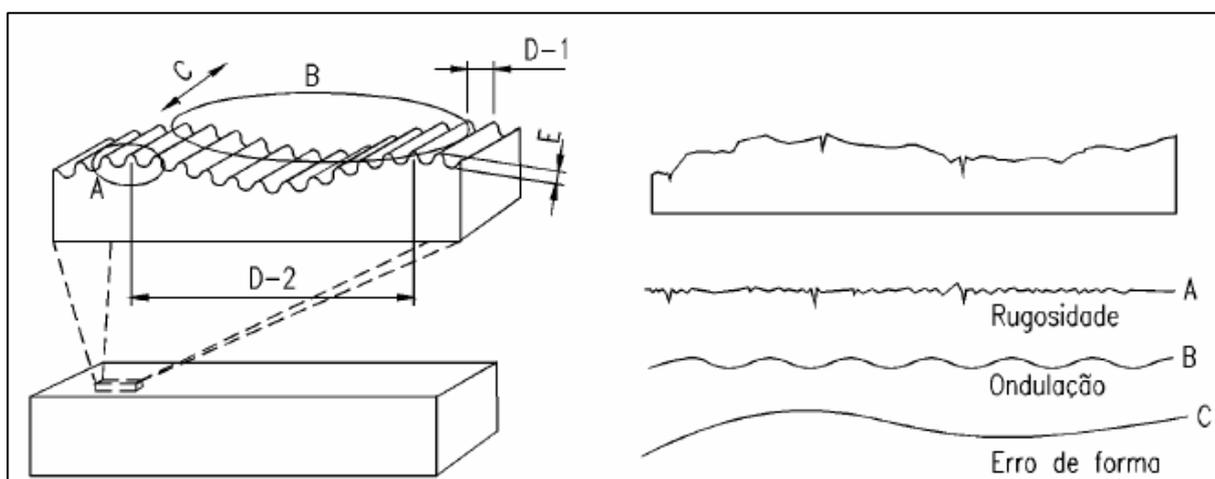


Figura 6 – Elementos que compõem o perfil de uma superfície (ROSA, 2007)

2.3.1.2 Ondulação

Segundo Morton (1991), ondulação é o conjunto de irregularidades de média frequência na superfície, e sobre a qual se encontra superposta a rugosidade, sendo parte integrante da textura da superfície.

Existe uma controvérsia considerável quanto se a ondulação (textura secundária) deve ou não ser incluída na avaliação da rugosidade. WHITEHOUSE (1994) considera a ondulação como um componente característico da superfície e associada à presença de defeitos relacionados ao processo de fabricação, portanto, ao se avaliar a textura da superfície, deve-se diferenciar a ondulação da rugosidade.

Ondulação e rugosidade possuem efeitos diferentes, portanto, devem ser tratadas em separado em situações onde se tem contato. Não é preciso fazer uma diferenciação entre a rugosidade e ondulação em aplicações de não contato, como o

caso de superfícies com finalidades de natureza visual (aplicações óticas), empregadas para dispersão de luz, por exemplo (ROSARIO, 2006).

No presente trabalho foi avaliada somente a rugosidade na textura da superfície das amostras de aço submetidas a tratamento superficial de jateamento abrasivo a seco.

2.3.1.3 Rugosidade: definições

O conceito de rugosidade é frequentemente descrito em termos como “*desigual*”, “*Irregular*”, “*grosseiro na textura*”, “*quebrado por proeminência*”, e outros similares (Thomas, 1999). Semelhante a algumas propriedades da superfície tais como a dureza, o valor da rugosidade superficial depende da escala de medição. Além disso, o conceito de rugosidade tem implicações estatísticas, uma vez que considera fatores como tamanho da amostra e intervalo de amostragem.

A rugosidade superficial ou textura primária é o parâmetro mais representativo para descrever a textura superficial, devido à sua influência direta no atrito, fadiga, resistência elétrica e térmica (SONG, et al., 1991).

A norma ASME B46.1-1996 (1996) descreve a rugosidade superficial como sendo as irregularidades finas (ou de alta frequência) geradas numa superfície, como resultado da interação da condição do material e da ação inerente do processo de remoção de material por parte da ferramenta de corte.

A rugosidade superficial é função do tipo de acabamento, da máquina-ferramenta ou do processo de fabricação utilizado. As superfícies assim produzidas apresentam-se como um conjunto de irregularidades, com espaçamento regular ou irregular e que tendem a formar um padrão ou textura característicos em sua extensão.

A rugosidade é formada por sulcos ou marcas deixadas pelo agente que atacou a superfície no processo (ferramenta, partículas abrasivas, ação química, entre outros) e se encontra superposta a um perfil de ondulação provocado por deficiência nos movimentos do equipamento empregado, deformação, tensões residuais, ou até mesmo pela variação de pressão exercida sobre a ferramenta utilizada (GONZÁLEZ, 1998).

A superfície, como dito anteriormente, caracteriza-se pela fronteira de um material com o ambiente. De acordo com Silva (2006) e González (1998), ela pode ser dividida em superfície geométrica, real e efetiva. A superfície geométrica é

aquela especificada nos projetos, de geometria e topografia ideal, mas os desvios gerados no processo de fabricação não permitem que seja obtida de forma absoluta. A superfície real é aquela que de fato é obtida após o último processo de fabricação. Já a superfície efetiva é a superfície que de fato foi medida, a partir da superfície real, com as limitações dos instrumentos utilizados para tanto.

As superfícies reais distinguem-se das superfícies geométricas (ideal, de projeto) através de suas diferenças de forma, sejam elas macro ou microgeométricas. Na análise dos desvios da superfície real em relação à superfície geométrica, pode-se distinguir os seguintes erros geométricos classificados a seguir:

- 1) Diferenças de forma de 1ª ordem: são aquelas diferenças que ao se examinar toda a superfície ou parte dela, só podem ser verificadas em toda a extensão. São exemplos desse tipo de erro de forma a ovalização, circularidade, planicidade e retilidade.
- 2) Diferenças de forma de 2ª ordem: são as chamadas “ondulações”.
- 3) Diferenças de forma de 3ª ordem: são as ranhuras ou sulcos provenientes do processo de fabricação.
- 4) Diferenças de forma de 4ª ordem: são chamadas de “estrias” ou “escamas” e ocorrem durante a formação do cavaco no processo de usinagem, formação de crateras em processos galvânicos ou na deformação do material durante o tratamento superficial de jateamento abrasivo.
- 5) Diferenças de forma de 5ª ordem: são estruturais e correspondem às diferenças causadas na superfície por processos de cristalização, modificações da estrutura por ação química e por processo de corrosão.

As diferenças de 1ª e 2ª ordem são consideradas macrogeométricas e são relativas à forma em toda extensão do corpo e com relações de amplitude muito maiores, respectivamente. Enquanto que as de 3ª a 5ª ordem são consideradas microgeométricas, sendo a rugosidade superficial correspondente às diferenças microgeométricas (CAMARGO, 2002).

As diferenças macrogeométricas podem ser medidas com instrumento convencional enquanto que as diferenças microgeométricas somente podem ser medidas com instrumentos especiais tais como rugosímetro e perfilógrafos que podem ser óticos, a laser ou eletromecânicos.

2.3.1.3.1 Medição da rugosidade superficial

Os conceitos de rugosidade superficial são definidos pela norma ABNT NBR 4287 (2002) - Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade.

A norma define sistema de avaliação, termos e conceitos relativos à rugosidade da superfície, procedimentos de avaliação por meio de instrumentos apalpadores elétricos e classificação da rugosidade por meio de parâmetros padronizados.

De acordo com a norma, perfil é a intersecção da superfície com um plano perpendicular a ela. O perfil, assim como a superfície, também pode ser classificado como geométrico, real ou efetivo, dependendo da superfície da qual ele foi obtido. A Figura 7 apresenta a representação da superfície real e geométrica, e do perfil geométrico e real.

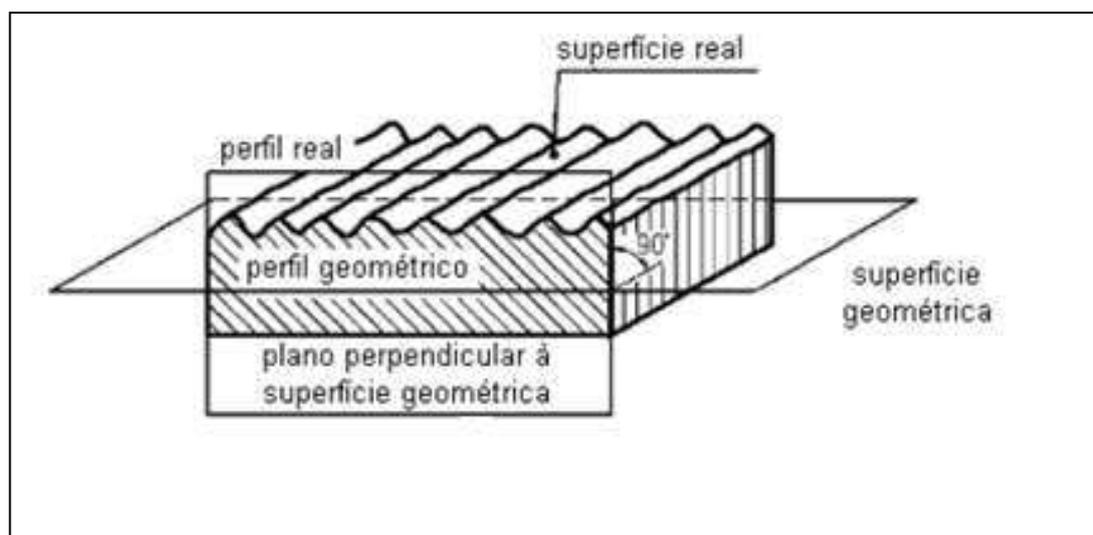


Figura 7 - Perfil real, cortado por um plano perpendicular (ROSA, 2007)

Quando se mede a rugosidade de uma superfície, geralmente o equipamento utilizado fornece o perfil composto da rugosidade e das ondulações. Para a medição da rugosidade, esta deve ser separada da ondulação e dos desvios macrogeométricos. Esta separação é realizada através da filtragem. Um filtro de rugosidade separa o perfil de rugosidade dos demais desvios de forma (PALMA, 2006). O comprimento de onda do filtro, chamado de "*cut-off*", determina o que deve passar e o que não deve passar.

A Figura 8 mostra o resultado de uma medição real de rugosidade realizada por um rugosímetro eletromecânico

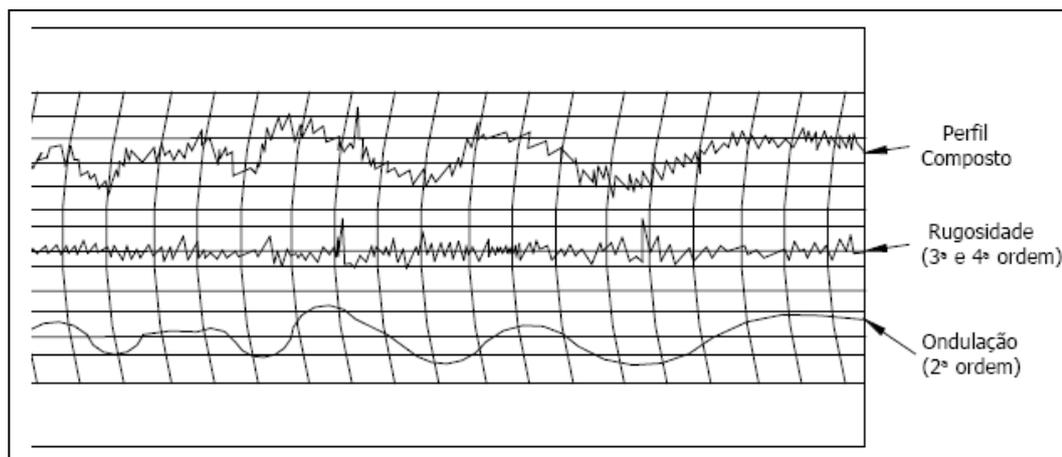


Figura 8 - Resultado da medição real da rugosidade por um rugosímetro eletromecânico (PALMA, 2006)

2.3.1.3.2 Sistemas de medição da rugosidade

De acordo com Rosa (2007) são usados dois sistemas básicos de medição da rugosidade: o da linha média, ou Sistema M, que é o mais utilizado, e o da Envoltente E que baseia-se em linhas envoltórias descritas pelo centro de dois círculos de raios R e r , respectivamente, que rolam sobre o perfil real da peça (PALMA, 2006).

No Brasil o sistema da linha média é o mais utilizado, em função de ser o sistema adotado pela norma NBR ISO 4287/2002 (PALMA, 2006). Além do Brasil, os EUA, Inglaterra, Japão e Rússia também adotam o sistema M. Já Alemanha e Itália adotam o Sistema E e a França adota ambos os sistemas.

No sistema da linha média, todas as grandezas da medição da rugosidade são definidas a partir da linha média. A linha média é a linha paralela à direção geral do perfil, no comprimento da amostragem, de tal modo que a soma das áreas superiores (picos), compreendidas entre ela e o perfil efetivo, seja igual à soma das áreas inferiores (vales), no comprimento da amostragem (L_e) conforme Figura 9, acrescentando ainda que o comprimento de amostragem é geralmente chamado de "cut-off" (ROSA, 2007).

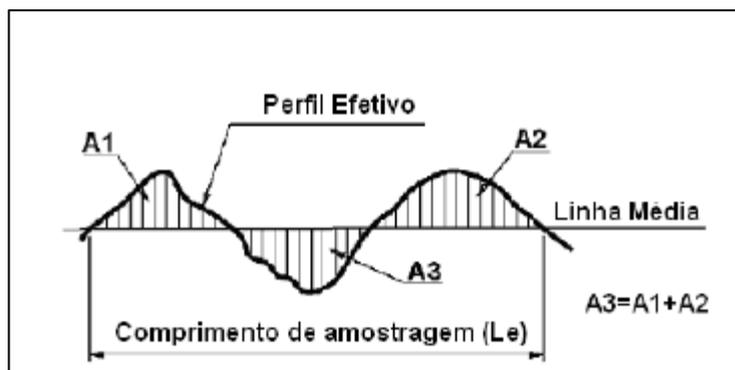


Figura 9 - Comprimento de amostragem (ROSA, 2007)

O “*cut-off*” é igual a um quinto do percurso de medição (L_m), ou seja, $L_e = L_m/5$, pois de acordo com a norma ABNT NBR ISO 4288 (2008), é recomendado que, para a medição da rugosidade, sejam tomados 5 comprimentos de amostragem conforme Figura 10. O comprimento de amostragem deve ser o suficiente para avaliar a rugosidade, isto é, deve conter todos os elementos representativos de rugosidade (PALMA, 2006).

Como o perfil apresenta rugosidade e ondulação, o comprimento de amostragem (*cut-off*) filtra a ondulação. Um valor de “*cut-off*” selecionado maior que o necessário, incluiria valores do perfil de ondulação que influenciariam nos resultados da medição da rugosidade (CAMARGO, 2002).

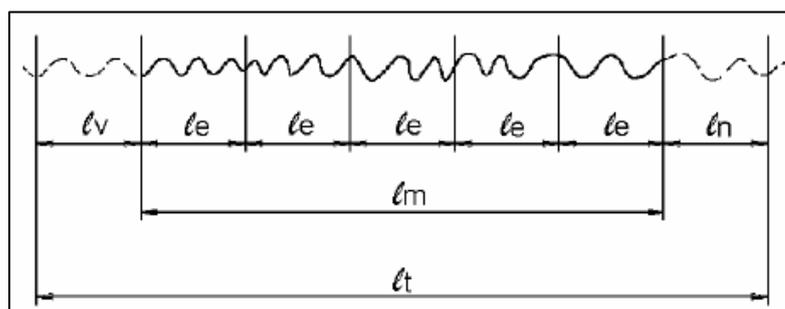


Figura 10 - Percurso de medição e comprimento de amostragem (ROSA, 2007)

Como pode-se observar na Figura 10, tem-se ainda o percurso inicial (L_v), que é a extensão da primeira parte do primeiro trecho, projetado sobre a linha média, que não é utilizado na avaliação da rugosidade. Este trecho inicial tem a finalidade de permitir o amortecimento das oscilações mecânicas e elétricas iniciais do sistema de medição e a centragem do perfil de rugosidade. O percurso final (L_n) é a extensão da última parte do trecho apalpado, projetado sobre a linha média e não utilizado na avaliação. O trecho final também tem a finalidade de permitir o amortecimento das

oscilações mecânicas e elétricas finais do sistema de medição. A soma dos percursos inicial, de medição e final ($L_t=L_v+L_m+L_n$) é chamada de percurso de apalpamento (L_t) (PALMA, 2006).

2.3.1.3.3 Parâmetros de avaliação da rugosidade

Em virtude dos fabricantes de equipamentos de medição de rugosidade não definirem parâmetros em comum para a maioria dos equipamentos existentes e de muitos usuários proporem parâmetros baseados unicamente em suas aplicações específicas, foram sendo criados novos parâmetros, contribuindo dessa forma para o surgimento exagerado de diversos parâmetros de perfis de rugosidade em duas dimensões, quando somente algumas propriedades topográficas principais relacionadas à geometria, estatística e função deveriam ser necessariamente descritas.

Em razão da limitação dos parâmetros 2D a análise de perfis de superfície 3D tem sido muito evidenciada pela indústria e centros acadêmicos, justamente por representar melhor uma superfície, uma vez que todas as superfícies interagem em três, e não em duas dimensões. No entanto, os parâmetros de rugosidade 3D ainda não estão normatizados e no Brasil a norma ABNT NBR ISO 4287 (2002) estabelece somente parâmetros para análise de perfis de rugosidade em duas dimensões.

A seguir serão apresentados alguns dos principais parâmetros de rugosidade utilizados no estudo das superfícies em duas dimensões.

2.3.1.3.3.1 Rugosidade média – Ra

O parâmetro Ra é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (y_i) dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição (L_m) conforme Figura 11. Essa grandeza pode corresponder à altura de um retângulo, cuja área é igual à soma absoluta das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média, tendo por comprimento o percurso de medição (L_m) (ROSA, 2007) e (CAMARGO, 2002).

A ABNT recomenda o parâmetro Ra (*Roughness Average*) para avaliação da rugosidade em micrometros (μm). Este mesmo parâmetro é utilizado pela norma inglesa com o nome de CLA (*Center Line Average*) e pela americana como AA (*Aritmetical Average*), sendo expresso em ambas (inglesa e americana) em micropolegadas (μin) (CAMARGO, 2002).

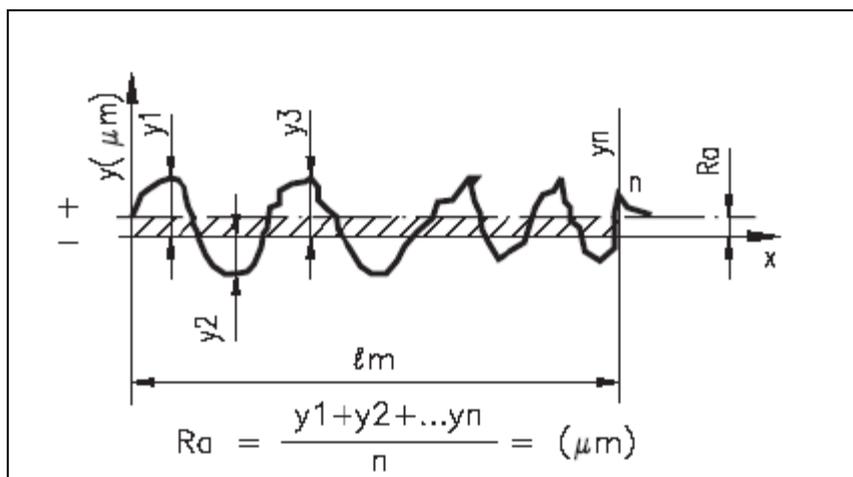


Figura 11 - Rugosidade média – Ra (CAMARGO, 2002)

Segundo Camargo (2002), o parâmetro Ra (*Roughness Average*) é o mais utilizado e aceito, por ser aplicável à maioria dos processos, por filtrar grandes variações que alterariam fortemente o valor medido e também por ser utilizada como indicação do estado de superfícies por equivalência a classe de rugosidades, como na norma NBR8401/1984 de Indicação do Estado de Superfícies em Desenhos Técnicos.

Dentre as vantagens desse parâmetro pode-se destacar segundo CAMARGO (2002):

- 1) É o parâmetro de medição mais utilizado em todo mundo;
- 2) É um parâmetro aplicável à maioria dos processos de fabricação;
- 3) Devido à sua grande utilização, quase a totalidade dos equipamentos apresentam esse parâmetro (de forma analógica ou digital);
- 4) Os riscos superficiais inerentes ao processo não alteram substancialmente o seu valor; e
- 5) Para a maioria das superfícies o valor da rugosidade neste parâmetro está de acordo com a curva de *Gauss* que caracteriza a distribuição de amplitude.

Dentre as desvantagens desse parâmetro pode-se destacar segundo Camargo (2002):

- 1) O valor de Ra em um comprimento de amostragem representa a média da rugosidade, por isso, se um pico ou vale não típico aparecer na superfície, o valor da média não sofrerá grandes alterações, ocultando tal defeito;

- 2) O valor de R_a não define a forma das irregularidades do perfil, dessa forma pode-se ter um mesmo valor de R_a para superfícies originadas por processos de fabricação diferentes;
- 3) Não é feita nenhuma distinção entre picos e vales; e
- 4) Para alguns processos de fabricação onde há uma frequência muito alta de vales ou picos, com no caso de sinterizados, o parâmetro não é adequado, já que a distorção provocada pelo filtro elevaria o erro a níveis inaceitáveis.

De acordo com Camargo (2002), para efetuar a medição do parâmetro R_a existem duas situações diferentes na seleção do valor do comprimento de amostragem, *cut-off*, dependendo do perfil ser periódico ou não periódico. Quando o perfil é periódico o valor de *cut-off* depende da distância entre os sulcos deixados pelo avanço da ferramenta. Para perfis onde não se consegue ver a periodicidade da ondulação, tal como acontece nas superfícies de peças jateadas, esmerilhadas e retificadas, utiliza-se os valores de *cut-off* estabelecidos pela norma ABNT NBR ISO 4288 (2008).

De acordo com Camargo (2002), para definir o valor aproximado da rugosidade pode-se usar inicialmente um valor de *cut-off* também aproximado (geralmente usa-se o valor 0,8mm).

2.3.1.3.3.2 Rugosidade média – R_z

É a média aritmética dos cinco valores da rugosidade parcial z_i (Figura 12). A rugosidade parcial z_i é definida como a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maiores afastamentos (acima e abaixo da linha média) existentes dentro de um comprimento de amostragem L_e (*cut-off*). Graficamente, este valor representa a altura entre os pontos máximo e mínimo do perfil, dentro do comprimento de amostragem L_e (PALMA, 2006).

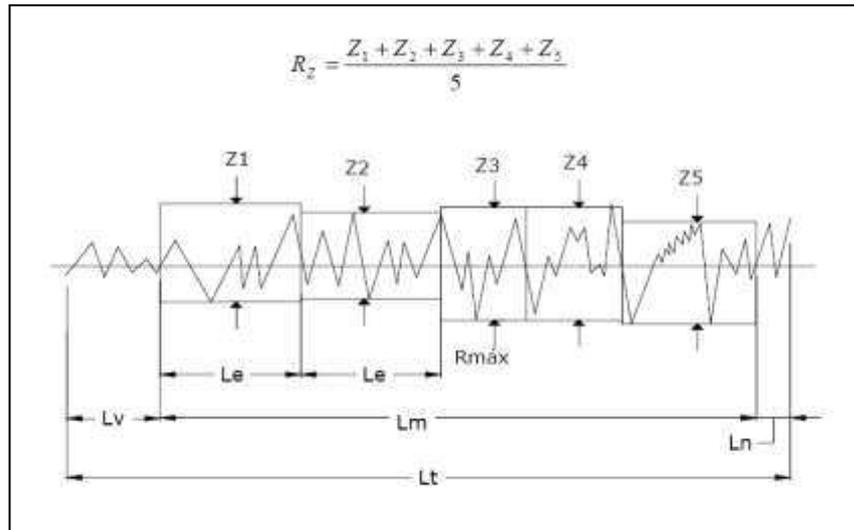


Figura 12 - Rugosidade média – Rz e Rugosidade máxima – Rmax (CAMARGO, 2002)

De acordo com Camargo (2002), o parâmetro Rz pode ser empregado em pontos isolados que não influenciam na função da peça a ser controlada (por exemplo, superfícies de apoio e de deslizamento, ajustes prensados) e em superfícies onde o perfil é periódico e conhecido.

Dentre as vantagens desse parâmetro pode-se destacar segundo Camargo (2002):

- 1) Informa a distribuição média da superfície vertical;
- 2) É de fácil obtenção em equipamentos que fornecem gráficos;
- 3) Em perfis periódicos, define muito bem a superfície; e
- 4) Riscos isolados serão considerados apenas parcialmente, de acordo com o número de pontos isolados.

Dentre as desvantagens desse parâmetro pode-se destacar segundo Camargo (2002):

- 1) Em algumas aplicações, não é aconselhável a consideração parcial dos pontos isolados, pois um ponto isolado acentuado será considerado somente em 20%, mediante a divisão de 1/5.
- 2) Não possibilita nenhuma informação sobre a forma do perfil, bem como da distância entre as ranhuras.
- 3) Nem todos os equipamentos fornecem esse parâmetro.

Também para esse parâmetro de rugosidade a norma ABNT NBR ISO 4288 estabelece para perfis aperiódicos valores de *cut-off*.

2.3.1.3.3.3 Rugosidade máxima – R_{max} ; R_y e Rugosidade total – R_t

Rugosidade máxima (R_{max}) é o maior valor das rugosidades parciais (z_i) que se apresenta no percurso de medição - L_m (PALMA, 2006).

R_y é a máxima distância pico-vale, dentro do comprimento de avaliação (PALMA, 2006). A Figura 13 mostra os parâmetros.

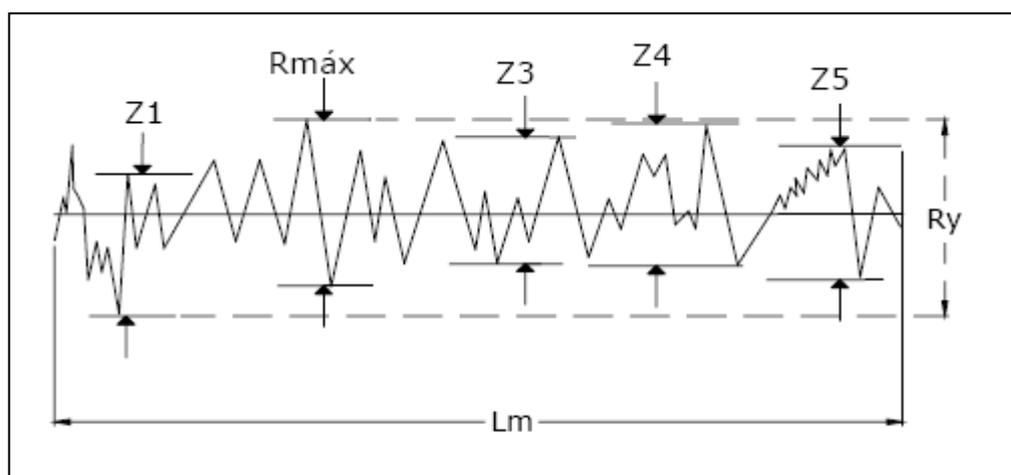


Figura 13 - Rugosidades máxima R_{max} e R_y (PALMA, 2006)

Pela definição de R_y encontra-se também o parâmetro R_t . ROSA (2007) define R_y como o maior valor das rugosidades parciais (z_i) que se apresenta no percurso de medição (onde na Figura 13 está representado como $R_{m\acute{a}x}$) e R_t como a máxima distância pico-vale, dentro do comprimento de avaliação (que na Figura 13 está representado como R_y).

A rugosidade total R_t corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação (L_m), independentemente dos valores de rugosidade parcial (Z_i) (ROSA, 2007).

Rosa (2007) comenta que o parâmetro R_t é mais rígido na avaliação que o R_y , pois considera todo o comprimento de avaliação e não apenas o comprimento de amostragem (*cut-off*), conforme Figura 14. Com essa afirmação entende-se que os dois parâmetros possuem a mesma definição, mas que diferem quanto ao comprimento de avaliação do perfil.

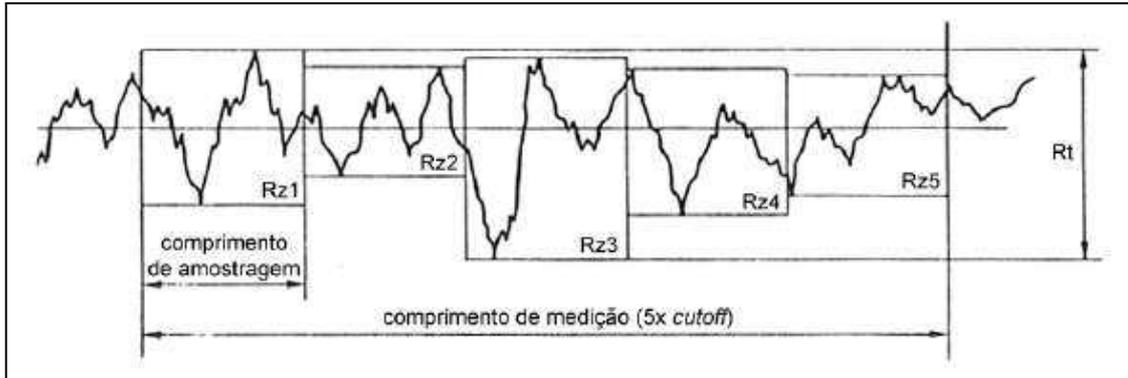


Figura 14 - Representação gráfica do perfil indicando o parâmetro R_t (ROSA, 2007)

2.3.1.3.4 Medição da rugosidade

Uma superfície é composta por várias escalas de rugosidades (Figura 15) superpostas umas às outras. Segundo Zahouani, et al. (2001) apud Silva (2006), as características da rugosidade multi-escala são relacionadas com diferentes aspectos dos processos pelos quais a superfície passou e, cada uma delas, influencia de maneira diferente o comportamento final da peça. Um modelo de superfície real deve considerar os níveis de rugosidade, microrrugosidade e submicrorrugosidade (MYSHKIN, et al., 1998).

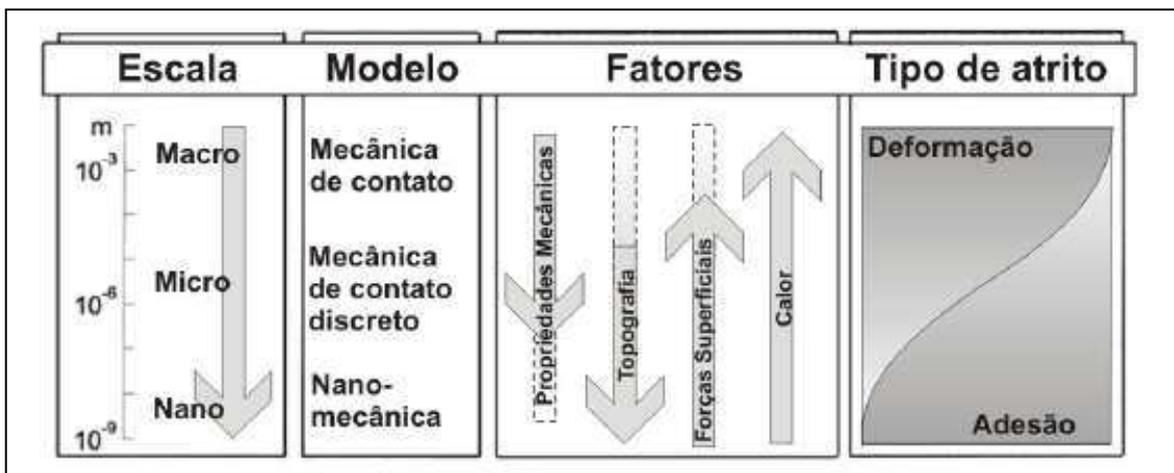


Figura 15 - Escalas de rugosidade e sua influência (MYSHKIN, et al., 1998)

Para grande parte das aplicações de engenharia a rugosidade é medida em micrometros (μm), no entanto ela pode fornecer informações em diferentes níveis de investigação. Para atender a demanda das diversas áreas do conhecimento envolvidas vários métodos de medição da rugosidade foram desenvolvidos.

A Figura 16 apresenta uma relação dos principais métodos utilizados com suas respectivas faixas de operação.

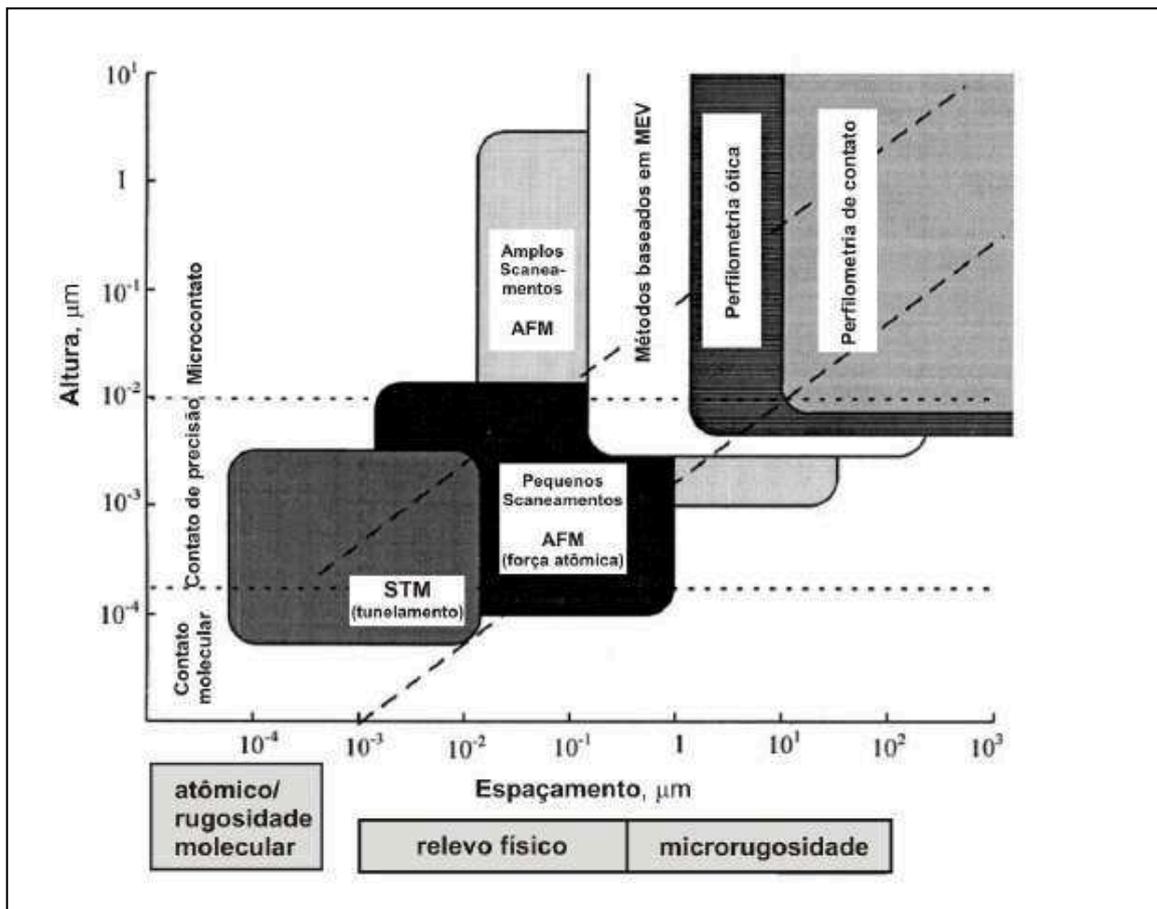


Figura 16 - Principais métodos de medição de rugosidade e suas faixas de operação (MYSHKIN, et al., 1998)

O aparelho eletrônico mais comumente utilizado para a medição da rugosidade superficial em peças e ferramentas é o rugosímetro. Inicialmente, este aparelho destinava-se somente à avaliação da rugosidade ou textura primária. Com o tempo, apareceram os critérios para avaliação da textura secundária, ou seja, a ondulação, e muitos aparelhos evoluíram para essa nova tecnologia. Mesmo assim, por comodidade, conservou-se o nome genérico de rugosímetro também para esses aparelhos que, além de rugosidade, medem a ondulação.

Os rugosímetros eletromecânicos têm sido muito utilizados nos últimos 50 anos. Tipicamente seu princípio de operação é um apalpador que percorre a superfície enquanto que seus deslocamentos de altura (verticais) são convertidos em sinais elétricos por um transdutor. O sinal elétrico passa por um amplificador, por um filtro

(composto basicamente por dois resistores e dois capacitores) e por um conversor AD (analógico-digital) para então ser obtido o perfil de rugosidade.

Palma (2006) destaca que os rugosímetros utilizam filtros que deixam passar apenas os sinais de alta frequência e eliminam os sinais de baixa frequência. Como o sinal da rugosidade em geral apresenta altas frequência (pequenos comprimentos de onda) e as ondulações e demais erros de forma apresentam sinais com baixa frequência (altos comprimentos de ondas), esse equipamento é limitado e não mede valores altos de rugosidades.

Segundo Faccio (2002) os perfis de rugosidade costumam ser obtidos por contato direto, através de rugosímetros, e dois grandes efeitos podem modificar a aquisição do perfil analisado e, conseqüentemente, fornecer perfis de superfície que não retratem a realidade: a carga aplicada ao apalpador de leitura e o raio da ponta do apalpador.

Com relação à distorção provocada pela carga aplicada pelo apalpador pode-se afirmar que é praticamente impossível obter uma leitura de perfil por contato, sem que este contato não danifique a superfície em questão, portanto, alterando o perfil analisado e diferenciando-o do registrado pelo aparelho (FACCIO, 2002). Sendo a ponta do apalpador normalmente fabricado em material de altíssima dureza, ela acaba por causar riscos na superfície a ser medida e com o tempo a própria ponta do apalpador acaba sofrendo avarias, principalmente devido ao mau uso (Figura 17). Por esta razão é necessário checar regularmente a ponta do apalpador através de um padrão de referência calibrado.

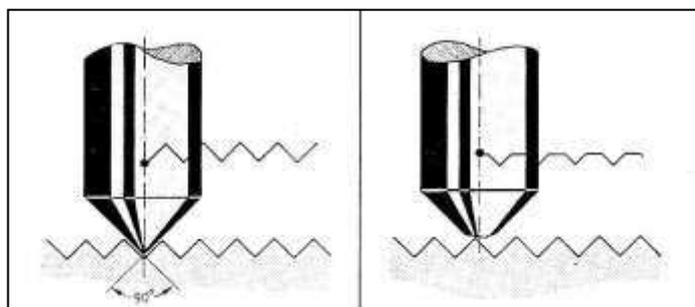


Figura 17 - Efeito de uma ponta danificada sobre um perfil (SILVA, 2006)

Já o efeito provocado pelo raio de ponta do apalpador (Figura 18) baseia-se no conceito que, por menor que seja o raio utilizado para coletar o perfil de rugosidade, este sempre será maior que zero. Conseqüentemente este apalpador não poderá reconhecer perfis de rugosidade cuja dimensão seja muito menor que a de seu raio,

retratando o perfil adquirido como uma curva tangente à circunferência descrita pelo raio de sua ponta (FACCIO, 2002).

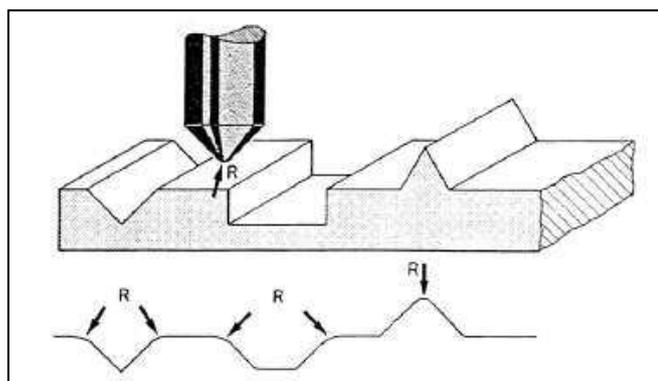


Figura 18 - Comparação entre o perfil real e o perfil medido com um apalpador (FACCIO, 2002)

Existem como alternativas sistemas óticos, que obtém o perfil de rugosidade sem ter a necessidade de contato físico com a superfície a ser medida, são eles: Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e microscópio de interferometria ótica em que o perfil da superfície é adquirido por meio de varredura de algum tipo de onda eletromagnética. Através destes equipamentos é possível registrar perfis de rugosidade sem modificação alguma em sua estrutura, ao menos no nível microscópico.

Entretanto, esses equipamentos não são substitutos de rugosímetros e perfilômetros. São mais um complemento para auxiliar na análise de perfis obtidos com rugosímetros, uma vez que são equipamentos menos práticos, de uso quase exclusivo de laboratório, além de serem limitados por uma distância focal específica, que conforme a característica do perfil pode impossibilitar a sua obtenção, principalmente quando se trata de superfícies irregulares (FACCIO, 2002).

Ao contrário de outras áreas da tecnologia, no campo da rugosidade superficial, diferentes técnicas de medição costumam apresentar diferenças consideráveis. Técnicas de medição óticas como o Laser são capazes de produzir uma imagem mais detalhada do perfil da superfície em comparação com métodos mecânicos. Dessa forma, valores descritivos de parâmetros de rugosidade superficial obtidos com o sistema a Laser costumam ser de uma a sete vezes maiores do que os obtidos através de sistema óticos. Apenas os valores principais do perfil de rugosidade são similares para ambos os métodos de tratamento (SILVA, 2006).

No caso de superfícies mais suaves essa diferença pode ser ainda maior, em razão da baixa rugosidade os vales são menores e o apalpador mecânico não consegue atingi-los devido a seu raio finito (MUMMERY, 1992 apud SILVA, 2006).

A Figura 19 ilustra a diferença de um perfil medido com um apalpador de ponta 5,0 μm e o mesmo perfil medido através de laser.

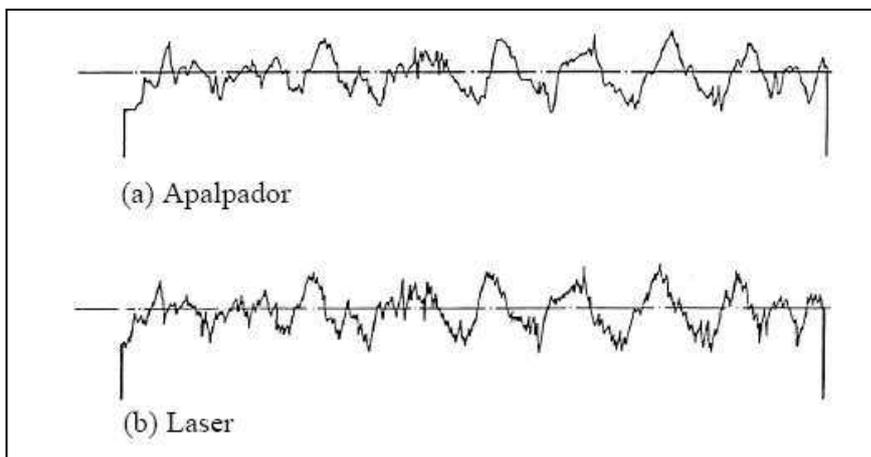


Figura 19- Comparação entre perfil medido (a) com apalpador e (b) através de laser (SILVA, 2006)

2.4 Teoria Mecânica da Adesão

O fenômeno de adesão era conhecido por nossos antepassados há muito tempo e, sem dúvida, despertou intensamente a curiosidade de muitas “*mentes curiosas*”. Sabemos que Isaac Newton estava interessado nela e desafiou “*os filósofos experimentais*” para descobrirem o porquê das “*coisas grudarem por uma atração muito forte*”. Porém, é relativamente recente o período em que o fenômeno se tornou objeto de pesquisa científica (PACKHAM, 2006).

O clássico artigo científico “*On adhesives and adhesive action*”, publicado por McBain e Hopkins em 1925, é considerado o ponto de partida para o desenvolvimento da moderna teoria de adesão. Esse artigo é considerado o primeiro trabalho científico sobre a ação dos adesivos e popularizou o conceito de “adesão mecânica” (PACKHAM, 2006).

Adesão é um fenômeno de interesse em diversas disciplinas científicas e de importância em uma vasta gama de tecnologias, tornando-se nos últimos anos um campo muito importante para estudos. A principal aplicação da adesão é na colagem de juntas adesivas (SCHULTZ, et al., 2003).

Essa técnica vem substituindo, pelo menos parcialmente, técnicas clássicas de fixação mecânica como parafusos ou rebites, tornando-se viável e competitiva principalmente porque permite economia de peso, garante uma melhor distribuição de tensões, e oferece melhor estética, uma vez que a linha de colagem é praticamente invisível. Aplicações de colagem por adesivos podem ser encontrados em muitas indústrias, especialmente em áreas de tecnologia avançada como a indústria automobilística, aeronáutica, espaço e eletrônica. Adesivos também foram introduzidos em áreas como odontologia e medicina (SCHULTZ, et al., 2003).

Os mecanismos de adesão têm sido estudados há anos e muitas teorias têm sido propostas com o intuito de se explicar o fenômeno da adesão. Contudo, uma teoria apenas não é suficiente para explicar a adesão de uma forma geral e abrangente. A ligação de um adesivo a outro objeto ou superfície é a soma de forças mecânicas, físicas e químicas que se sobrepõem e influenciam umas às outras.

A ASTM D 907-08b (1999) define adesão como “*O estado em que duas superfícies são mantidas unidas por forças de interfaces*”.

O princípio envolvido na teoria da adesão mecânica é antigo e intuitivo e está relacionado ao fato de que o aumento da irregularidade da superfície do substrato

promove uma melhor ancoragem (travamento) mecânica do adesivo, além de criar uma superfície limpa, isenta de substâncias e de baixa energia superficial e de também aumentar a área superficial (de contato) a ser colada. Isto é semelhante à colagem sobre madeira, onde a cola se encaixaria nas irregularidades da superfície áspera da madeira.

A rugosidade responsável pelo mecanismo de adesão por ancoramento pode ser produzida, dentre outros processos, por tratamentos superficiais como a irradiação com laser, o jateamento com granalha de aço ou o lixamento manual, que promovem as macrorrugosidades, ou por tratamento químico com soluções ácidas, que promovem a microrrugosidades.

A Figura 20 ilustra o conceito de travamento mecânico.

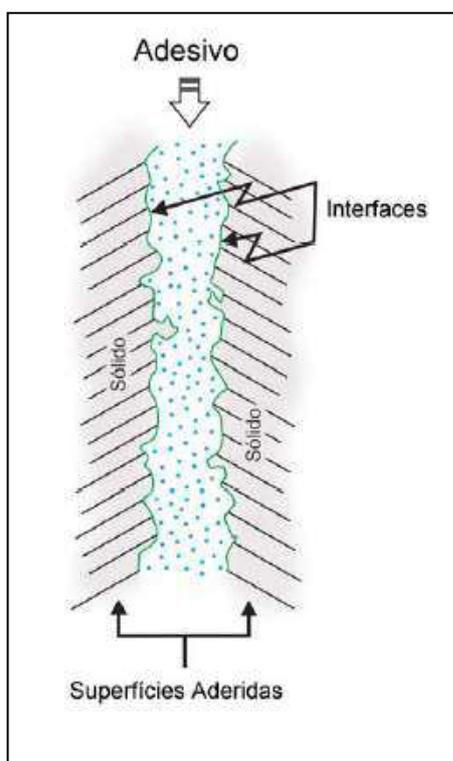


Figura 20 - Representação esquemática de uma junção adesiva (FURUSE, 2005)

Embora tenha sido uma explicação simples e intuitiva, a teoria mecânica foi aceita (e continua ainda) durante um período considerável, ela foi suficiente para explicar a resistência adesiva quando empregada em materiais fibrosos como madeira ou couro (ALLEN, 2005).

Mais tarde, com o uso de adesivos, mesmo que com sucesso modesto em superfícies lisas e impermeáveis, a teoria inicial se mostrou insuficiente, pelo menos

para estes materiais, tornando evidente que esse conceito deve ser considerado em duas escalas diferentes. Enquanto está claro que um intertravamento mecânico não pode ser uma explicação universal, adequada para todo tipo de adesão, por outro lado, existem vários exemplos de sua importância em uma escala macroscópica (ALLEN, 2005). A conclusão, portanto, é que o travamento mecânico é um ingrediente importante, que contribui para o aumento da resistência adesiva.

Ao longo de mais de oitenta anos, em diferentes momentos, a teoria de adesão mecânica sofreu diversas críticas e avaliações a respeito de sua importância, o que ocasionou mudança em sua posição, mas ainda assim, ela encontra um lugar nas discussões contemporâneas da moderna teoria de adesão (PACKHAM, 2006).

Atualmente o debate em torno de aderência mecânica diz respeito ao significado do intertravamento mecânico em explicar a superfície de adesão. De um lado da discussão, pesquisadores acreditam que o intertravamento mecânico proporcione uma maior força de aderência. Entretanto, outros pesquisadores acreditam que a função da rugosidade da superfície é simplesmente incrementar a área de contato para se obter um maior número de interações moleculares (AWAJA, et al., 2009).

2.4.1 Histórico da teoria mecânica de adesão

A primeira pesquisa científica realizada sobre adesão em 1925 por McBain e Hopkins considerou a existência de dois tipos de adesão: mecânica e específica.

A adesão específica envolvia "alguma espécie de interação" entre a superfície lisa não porosa e o adesivo. Essa interação pode ser "química ou adsorção ou simplesmente molhamento". A adesão específica se tornou o modelo que hoje é descrito nos termos da teoria de adsorção. Atualmente a adesão específica compreende as forças intermoleculares, a termodinâmica e as ligações químicas.

Em contrapartida, a adesão mecânica só foi considerada possível por McBain e Hopkins em materiais porosos. Segundo esses autores ela ocorreria "quando qualquer material líquido solidifica-se *in situ* para formar uma película sólida nos poros". Como exemplos eles citaram a adesão em madeira, porcelana não vidrada, pedra-pome e carvão (PACKHAM, 2006).

Para McBain e Hopkins a teoria da adesão mecânica foi muito mais uma concepção intuitiva, e eles escreveram "*É óbvio que deve resultar numa boa união quando um filme forte e contínuo de adesivo parcialmente incorporado é formado in situ*" (PACKHAM, 2006).

O modelo de intertravamento mecânico, proposto por MacBain e Hopkins, em 1925, consiste na ancoragem ou travamento mecânico do adesivo nas cavidades, poros e asperezas da superfície sólida para ser o principal fator na determinação da força de aderência (SCHULTZ, et al., 2003).

McBain e Hopkins consideraram em seu artigo que o mecanismo da adesão mecânica poderia funcionar como um mecanismo independente da ação adesiva. Também distinguiram adesão em superfície porosa de adesão em superfície rugosa, relatando que a rugosidade teria pouca influência sobre a adesão (PACKHAM, 2006).

Um dos mais consistentes exemplos ilustrando a contribuição do travamento mecânico foi dado em 1949 por Wake e Boroff em seu trabalho sobre adesão entre borracha e tecido de fibra natural (algodão). Os autores demonstraram que o fator mais importante dessa adesão foi a penetração das fibras na borracha, uma vez que o tecido utilizado era isento de material sintético, e dessa forma, qualquer interação específica (química) entre a borracha e a fibra do tecido seria insignificante e afetaria somente as extremidades das fibras incorporadas à borracha. Segundo os autores não houve penetração significativa da borracha na trama do tecido e a resistência da união entre a borracha e o cordão de tecido dependia somente do número de extremidades de fibras incorporadas à borracha e da profundidade dessa penetração (ALLEN, 2005).

No entanto, a possibilidade de estabelecer uma boa aderência entre superfícies lisas levou à conclusão de que a teoria de travamento mecânico não poderia ser considerada universal (PACKHAM, 2006).

Em 1976, Wake escreveu em seu livro *“Adhesion and the Formulation of Adhesives”* que juntas adesivas frequentemente possuem um importante componente mecânico, indispensável para o desempenho do conjunto, mas esse componente não é suficiente como mecanismo único para manter as superfícies unidas. Ele deve ser incrementado, melhorado com a adesão específica. Wake propôs que os efeitos das interações interfaciais termodinâmicas (adesão específica) e do travamento mecânico podem ser considerados como fatores multiplicadores para estimular a resistência de energia de fratura da junta (SCHULTZ, et al., 2003), conforme Equação 1 (Fatores multiplicadores da energia de fratura da junta).

$$G = (\text{constante}) \times (\text{travamento mecânico}) \times (\text{interação interfacial}) \quad (\text{Eq. 1})$$

De acordo com a equação acima, um elevado nível de adesão poderá ser alcançado através da melhoria da morfologia da superfície e das propriedades físico-químicas da superfície do substrato e do adesivo. No entanto, na maioria dos casos, o aumento da adesão por travamento mecânico pode ser atribuído simplesmente ao aumento da área interfacial (de contato) devido à rugosidade da superfície, na medida em que as condições de molhabilidade estão presentes para permitir a penetração do adesivo nos poros e cavidades.

Uma das críticas mais importantes da teoria de travamento mecânico, como sugerido em diversos estudos, é que provavelmente a adesão não é necessariamente o resultado de um mecanismo de bloqueio mecânicos mas que a rugosidade da superfície pode aumentar a energia dissipada viscoelasticamente ou plasticamente ao redor das reentrâncias (rugosidade) e no interior do material durante a fratura da junta. Efetivamente, agora é bem compreendido que esta perda de energia é muitas vezes o principal componente da força adesiva (SCHULTZ, et al., 2003).

A importância da porosidade foi novamente restabelecida em 1984 por Venables quando em seu artigo ele declarou que para o alumínio e o titânio determinados ataques químicos ou processos de pré-tratamento de anodização produzem filmes de óxidos na superfície do metal, que por causa de sua porosidade ou microrrugosidade trava-se mecanicamente com a estrutura do polímero mais fortemente do que se a superfície fosse lisa (PACKHAM, 2006).

Desde então, a aceitação de uma “teoria mecânica” não foi mais seriamente questionada, e agora encontra um assento no contexto da moderna teoria de adesão. Como pode ser observado, as principais características da teoria mecânica foram restabelecidas no século passado, nas décadas de 70 e 80, sendo confirmadas por uma ampla gama de situações experimentais (PACKHAM, 2006).

A teoria se revelou um instrumento útil no sentido de ter estimulado o desenvolvimento de novos tratamentos de superfícies de metais, polímeros e fibras, dando um embasamento teórico aos experimentos. Talvez exista uma tendência atual, uma vez que, a teoria é outra vez “respeitável” de invocar “efeitos mecânicos” de uma forma pouco criteriosa sempre que um aumento da rugosidade da superfície é observado (PACKHAM, 2006).

2.4.2 Influência da rugosidade da superfície

Como visto anteriormente, diversos autores propõem que o travamento mecânico pela penetração do adesivo nas irregularidades do substrato seja a força principal de atuação na adesão. Nesse âmbito, o pré-tratamento do substrato, no sentido de se obter uma topografia mais rugosa e apropriada à ocorrência da adesão, vem a ser um importante fator de influência.

As pesquisas realizadas demonstram a preocupação em se verificar a verdadeira influência do tratamento superficial na melhoria da resistência adesiva.

Travamento mecânico e modificações de ângulo de contato são dois efeitos fundamentais da rugosidade da superfície. O primeiro está relacionado com a "ondulação" da superfície, enquanto o segundo é influenciado pela "macrorrugosidade". O valor do ângulo de contato feito pelo líquido na superfície sólida é modificado pela rugosidade, de acordo com a relação de WENZEL (1936).

No caso em estudo, ou seja, a interface colada metal/isolante térmico no interior de envelopes motores foguetes, pode-se dizer que as forças físico-químicas (ligações de Van der Waals, por exemplo), apesar de terem primordiais, geram ligações fracas, indicando que o travamento com as macrorrugosidades da superfície tem um papel importante na resistência dessa adesão. Pesquisas realizadas com substratos pouco porosos resultaram em baixos valores de resistência adesiva, por não permitirem o travamento mecânico (LIMAVERDE, et al., 2006).

2.4.2.1 Fator rugosidade: Aumento da área de contato

Parece óbvio que uma superfície mais áspera pode resultar em melhor adesão que uma superfície lisa, como resultado de uma área maior de contato.

Se a interface entre as fases é perfeitamente lisa, não há problema em definir a área interfacial "A". Entretanto, a maioria das superfícies com que trabalhamos tem um determinado grau de rugosidade. Se esse valor de rugosidade não é muito elevado, é adequadamente possível expressá-lo pelo fator de rugosidade de Wenzel (WENZEL, 1936), definido pela seguinte relação (Equação 2):

$$r = \frac{A}{A_0} \quad (\text{Eq. 2})$$

Em uma superfície com maior fator de rugosidade “ r ”, definido pela relação entre a área real “ A ” e a área nominal “ A_0 ”, conforme a Equação 2, espera-se que ocorra um aumento efetivo na resistência de adesão. Para superfícies moderadamente ásperas, um aumento da área superficial pode levar a um aumento proporcional na adesão, enquanto a rugosidade não reduz o contato entre as superfícies (GENT,1995 apud PACKHAM, 2003). Gent e Lai demonstraram de forma convincente os efeitos em experimentos com adesão em borracha. Ao compararem a adesão em superfície de aço lisa e jateada com abrasivo, observou-se um aumento na energia ao descascamento de duas a três vezes o atribuído ao aumento na área superficial (PACKHAM, 2003).

Essa abordagem tradicional pelo fator de rugosidade supera a complexidade da rugosidade superficial, ao tratar as superfícies como se todas fossem intrinsecamente lisas, aplicando-se um fator de correção para a rugosidade (PACKHAM, 2006).

2.4.3 Adesão específica: Aspectos termodinâmicos

A adesão específica diz respeito aos mecanismos que dependem da superfície específica disponível, isto é, a soma de superfícies individuais de contato. Dentre os mecanismos de adesão específica, as interações moleculares são baseadas no princípio de que a ligação entre duas fases distintas vem das forças intermoleculares e interatômicas, cujo efeito resulta das atrações elétricas. As forças de Van der Waals e as conexões pelas pontes de Hidrogênio (H) são as duas categorias de interações moleculares fundamentais.

Desse modo, para obter uma melhor compreensão da adesão e de sua relação com a rugosidade da superfície é necessário um estudo com base nos mecanismos termomecânicos, uma vez que o fenômeno de adesão está relacionado ao comportamento das tensões superficiais e à energia de superfície dos materiais envolvidos. Dessa forma o conhecimento e avaliação da superfície são de fundamental importância, requerendo a utilização de métodos específicos.

O fundamento destes métodos, tratado em diversos textos, é que as moléculas que estão na superfície de um material não estão submetidas às mesmas condições das outras inseridas no meio do material, ou no “*bulk*”. Na superfície as moléculas são atraídas para o seu interior e para os lados, e não há uma compensação dessas

forças para fora da superfície. Desse equilíbrio de forças surge uma força tangencial à superfície conhecida como tensão superficial (ALVES, 2003).

No caso da interface colada metal/isolante térmico utilizada nos envelopes motores foguetes, uma vez que a colagem ocorre com o adesivo no estado líquido, considerou-se para fins de ângulo de contato, tensão superficial e interfacial o mecanismo de adesão na condição líquido/sólido.

2.4.3.1 Molhabilidade

A ideia de molhabilidade está associada à interação de um líquido com uma superfície sólida. Tal interação pode levar ao espalhamento do líquido sobre a superfície, a penetração do líquido nos poros do meio ou ainda o seu escoamento sobre essa superfície sob a forma de gotas (JOHNSON, et al., 1993 apud BURKARTER, 2006).

Molhabilidade define a extensão na qual um líquido se espalhará sobre uma superfície sólida. Boa molhabilidade significa que o líquido fluirá sobre o sólido cobrindo cada reentrância do mesmo e retirando todo o ar entre eles; o umedecimento somente ocorrerá se o líquido tiver uma baixa viscosidade e se o umedecimento resultar em um decréscimo da energia livre do sistema. A molhabilidade da superfície pode ser quantificada pelo ângulo de contato de um líquido com a superfície do sólido.

Várias teorias sobre ângulo de contato e fenômenos de superfície têm sido publicadas desde os estudos de Thomas Young (1805) e J. Willard Gibbs (1880). O primeiro afirmou que o equilíbrio entre as forças atrativas entre as partículas de fluido e as do sólido faria com que o fluido formasse um determinado ângulo com o sólido. Gibbs, no entanto, relacionou o ângulo de contato não a um balanço de forças, mas ao conceito de energia de superfície. Ele propôs que a linha trifásica entre um sólido insolúvel e dois fluidos se deslocaria sobre a superfície sólida até que atingisse um ponto em que qualquer deslocamento na linha criaria um acréscimo na energia livre, associada à linha trifásica. Essa condição de equilíbrio (energia livre mínima) se reduz à Equação 3, conhecida como Equação de Young, que relaciona o ângulo de contato θ , entre um líquido e uma superfície sólida, através das tensões interfaciais líquido-vapor (γ_{LV}), sólido-vapor (γ_{SV}) e sólido-líquido (γ_{SL})

$$\gamma_{LV} \cdot \cos \theta = \gamma_{SV} - \gamma_{SL} \quad (\text{Eq. 3})$$

O ângulo de contato θ na Equação 3 é definido entre a tangente da superfície do líquido e uma superfície horizontal. A Figura 21 ilustra o ângulo de contato utilizado no estudo da molhabilidade da superfície.

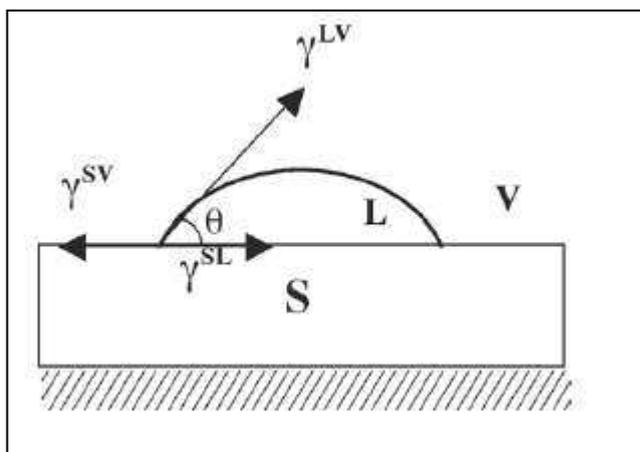


Figura 21 - Representação das energias interfaciais e ângulo de contato (LUZ, et al., 2008)

Para uma superfície de molhabilidade considerável, o ângulo de contato θ deve ficar abaixo de 90° , e esta superfície é chamada de hidrófila. Se este ângulo de contato for zero a superfície é completamente molhada, como é mostrado na Figura 22 (a), neste caso, a superfície é chamada de super-hidrófila. Quando θ é maior que 90° a superfície não é molhada, e então é chamada de hidrófuga. Entretanto se o ângulo de contato é superior a 165° ou igual a 180° , como mostra a Figura 22 (c), a superfície é chamada super-hidrófuga (BURKARTER, 2006).

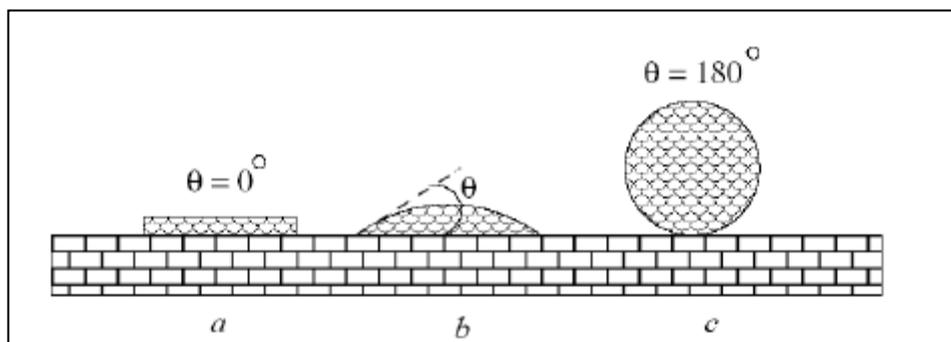


Figura 22 - Condições de molhabilidade de uma superfície para diferentes ângulos de contato θ (BURKARTER, 2006)

- a) superfície superhidrófila (ou com alta molhabilidade) $\theta = 0^\circ$
- b) superfície com molhabilidade parcial $0 < \theta < 180^\circ$

c) superfície superhidrófuga (ou sem molhabilidade) $\theta = 180^\circ$

Na prática, quase todos os líquidos se espalham parcial ou completamente nas superfícies sólidas. A exceção seria o caso de metais líquidos, como o mercúrio sobre sólidos orgânicos, onde se consegue um ângulo próximo a 180° .

Por exemplo, a água em Téflon®, forma um ângulo de contato observado de 120° , sendo muito difícil exceder esse valor a menos que se use um líquido exótico como o mercúrio. Conforme observado anteriormente, no caso extremo onde o ângulo é muito próximo a 180° ($>160^\circ$ na prática), a superfície é super-hidrófuga. Como exemplo, pode-se citar as folhas vegetais e as penas do pato que são lubrificadas (BICO, 2000).

Também é importante ressaltar que na dedução da Equação de Young, empregou-se um sistema ideal em que não foram consideradas a rugosidade, a heterogeneidade, a contaminação e a mobilidade das superfícies, e tampouco as propriedades do líquido, tais como viscosidade, ou outros efeitos que fariam os ângulos de contato diferir dos valores previstos pela Equação de Young. Além disso, na termodinâmica de superfícies, a minimização da energia livre do sistema impõe um único valor para o ângulo de contato. No entanto, foi experimentalmente observado que uma gota de líquido na superfície sólida pode apresentar vários ângulos estáveis, variando continuamente entre dois valores bastante reprodutíveis, o máximo chamado de ângulo de avanço e o mínimo, o ângulo de retrocesso (NICOLAIEWSKY, et al., 2000). Esta observação foi relatada pela primeira vez em 1890 e chamada, trinta anos depois, de "*histerese do ângulo de contato*". A histerese do ângulo de contato tornou-se uma ferramenta analítica valiosa, fornecendo informações sobre energia, rugosidade e heterogeneidades das superfícies (MORRA, et al., 1990 apud COUTINHO, 2007).

2.4.3.2 Lei de Wenzel

A influência da rugosidade da superfície no ângulo de contato aparente foi discutida primeiramente por WENZEL (1936). A sua ideia básica era que "numa unidade de área superficial (rugosa) há mais área e, portanto, há uma maior intensidade de energia de superfície, do que na mesma unidade de área de superfície lisa". WENZEL (1936) aperfeiçoou a equação de Young, que considera um líquido sobre um sólido plano e liso, considerando o líquido sobre uma superfície

rugosa, conforme Figura 23 (BICO, 2000). Essa equação considerando o fator de rugosidade (r) é chamada de Lei de Wenzel (Equação 4)

$$\cos \theta^* = r \cdot \cos \theta \quad (\text{Eq. 4})$$

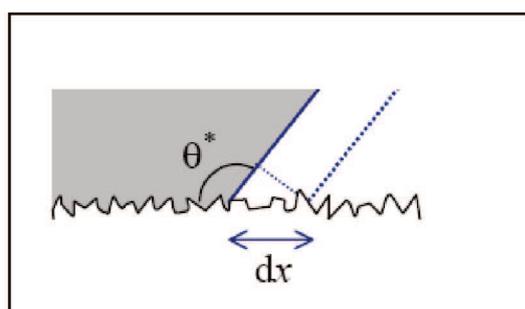


Figura 23 - Representação do deslocamento de um líquido sobre uma superfície rugosa. (BICO, 2000)

De acordo com Morra (MORRA, et al., 1990 apud COUTINHO, 2007), o efeito da rugosidade é o de aumentar as características de molhabilidade do sólido, isto é, o ângulo de Wenzel aumenta com o acréscimo da rugosidade se o ângulo de Young for superior a 90° e diminui se for inferior a 90° . Este desenvolvimento, porém, só é válido se a escala de rugosidade for inferior ao deslocamento dx (BICO, 2000). Ou seja, o deslocamento do fluido sobre a superfície deve ocorrer em conformidade com a grandeza de rugosidade do substrato, para que este parâmetro altere o ângulo de contato favorecendo a interface e garantindo o contato total (penetração) do fluido com a superfície rugosa (Figura 23). Caso contrário, se o deslocamento do fluido não for compatível com a rugosidade do substrato, a Lei de Wenzel não se aplica e poderá ocorrer a formação de bolsões de ar (Figura 24), chamados de efeito “Tapete de Fakir”.

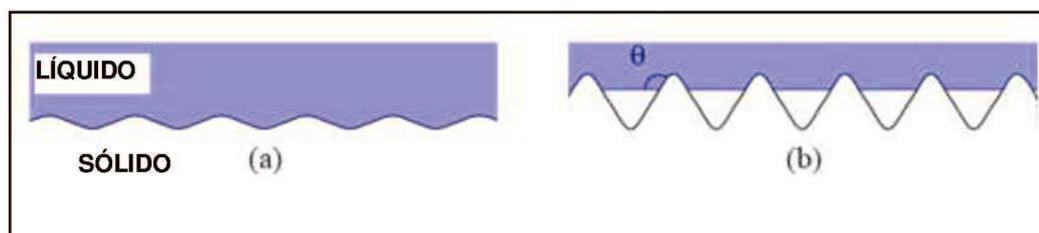


Figura 24- (a) líquido em contato total com a superfície, para uma superfície rugosidade com picos pouco elevados; (b) bolsões de ar sob o líquido (BICO, 2000)

Segundo BICO (2000) haverá o aprisionamento de ar na interface quando o fator de rugosidade “ r ” for superior a um valor crítico, quando então a linha de contato do líquido se posicionará recuperando o ângulo de equilíbrio θ , buscando a condição ideal para uma escala menor.

2.5 Juntas Adesivadas

Juntas coladas são consideradas a principal alternativa às juntas mecânicas convencionais dentre outras razões pela reduzida concentração de tensões, pela transferência de carga suave em largas áreas de colagem, pela resistência superior à fadiga, pela excelente relação resistência-peso, maior tolerância ao dano por conta do amortecimento intrínseco, custo reduzido por conta de processos de fabricação mais baratos, pela aerodinâmica otimizada dada a variedade de projetos possíveis, melhor aparência visual, excelentes propriedades elétricas e térmicas, além de resistência à corrosão no caso de juntas de substratos incompatíveis. A maioria das aplicações encontra-se na área de desenvolvimento de estruturas aeroespaciais, onde juntas feitas de materiais compósitos são utilizadas devido ao peso reduzido combinado à possibilidade de diferentes *designs* que permitem a redução da concentração de tensões (SILVA, 2007)

A preparação da superfície dos aderentes é o primeiro cuidado para a obtenção de uma adesão de qualidade em uma junção adesivada. O tratamento superficial visa remover a camada superficial original, desconhecida e não uniforme dos componentes a serem unidos pelo adesivo, garantindo uma superfície controlada, com uniformidade e repetibilidade, definindo um perfil de rugosidade, para permitir o controle do processo.

2.5.1 Aplicação de *primer*

É recomendável a aplicação de primer na superfície com o intuito de modificá-la e prepará-la para melhorar o contato e aderência com o adesivo. São três as principais funções dos *primers* :

1. proteger o substrato (camada mais superficial do aderente que possibilita sua junção a outro elemento) de contaminações ou alterações da superfície durante o período entre a preparação da superfície e a aplicação do adesivo;
2. penetrar nas rugosidades e porosidades, nivelando a superfície; e
3. dissolver pequenas quantidades de contaminações orgânicas.

Os *primers* ainda podem servir como veículo para os outros componentes, com as mais diversas finalidades, como inibir a oxidação, proporcionar melhor molhabilidade e controlar o espalhamento do adesivo (KINLOCH, 1986)

2.5.2 Tipo de fratura em juntas adesivadas

Os principais tipos de falhas que podem ocorrer em uma junta adesivada são:

1. Falha coesiva: a falha ocorre por rompimento no interior do filme de adesivo, o que pode ser observado quando existem resíduos de adesivo nas faces dos aderentes da junta.
2. Falha adesiva: esse tipo de falha ocorre por destacamento do adesivo do substrato, o que pode ser observado quando o adesivo permanece totalmente na superfície de um dos substratos, não havendo vestígios aparentes no outro lado da junta (no outro substrato). Esta falha pode ser real ou aparente, pois é comum ocorrer uma falha de coesão muito próxima de um dos substratos, de modo que o filme residual de adesivo não é observável visualmente (olho nu), mas pode ser detectado por técnicas de análise de superfície.
3. Falha de delaminação (do aderente): esse tipo de falha ocorre sem a ação direta do adesivo, provocada por um defeito de fabricação em um dos aderentes.

A figura 25 ilustra os principais tipos de falha em uma junta adesivada.

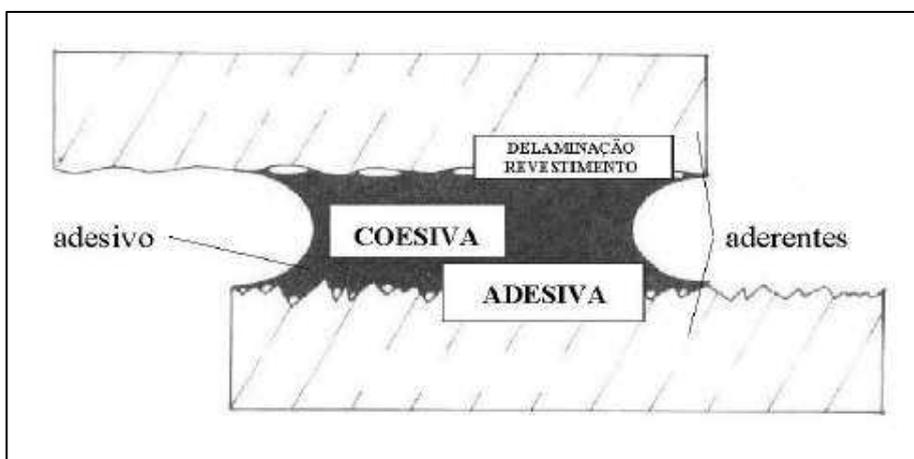


Figura 25 - Indicação da região referente às falhas coesivas, adesivas e delaminação do aderente (KINLOCH, 1986)

2.6 Tratamento Superficial

Um dos principais fatores associado ao sucesso de processos de adesão consiste no tratamento adequado da superfície a ser utilizada como substrato. É de conhecimento que para uma colagem ser eficiente em termos de resistência mecânica é fundamental o preparo da superfície. Em se tratando de adesivos, a aderência está diretamente ligada à preparação da superfície do substrato; a qualidade da ligação adesiva é proporcional ao tratamento superficial utilizado, o que possibilita aumentar a tensão superficial do substrato, incrementar a rugosidade da superfície (área de contato) e as trocas químicas na superfície do substrato (LIMAVERDE, et al., 2006). Segundo a teoria mecânica de adesão, a rugosidade da superfície permite a penetração do adesivo nas irregularidades, depositando-se nos vales entre os picos do substrato, promovendo desta forma o “*ancoramento*” entre as superfícies. Logo, o ancoramento depende tanto da preparação da superfície quanto das características físico-químicas do adesivo a ser usado (LIMAVERDE, et al., 2006).

Os tratamentos superficiais podem ser basicamente de dois tipos: tratamentos mecânicos, nos quais a superfície é atacada por jateamento em níveis diferentes de intensidade e com uma variedade de granalhas, tanto na forma quanto no material; e tratamentos químicos, nos quais o substrato é submetido ao ataque por solução ácida específica, em concentrações e períodos pré-determinados. Os tratamentos mecânicos são, em sua maioria, os responsáveis pela obtenção dos níveis mais elevados de rugosidade média (*Roughness Average – Ra*), produzindo superfície com grande número de picos e vales, tão mais pronunciados quanto maior a intensidade do jateamento. Por outro lado, os tratamentos químicos são geralmente utilizados quando se deseja obter níveis maiores de microrrugosidade (SOARES, et al., 2006).

Tanto a macrorrugosidade quanto a microrrugosidade estão diretamente associadas a uma ancoragem mecânica e à molhabilidade do adesivo, elementos principais em um processo de adesão. Uma superfície com um elevado número de vales superficiais pronunciados possui uma capacidade teoricamente maior de retenção de fluido. Os vales consistirão, assim, em sítios para uma ancoragem mecânica otimizada, o que conduzirá a uma adesão mais resistente do ponto de vista mecânico (SOARES, et al., 2006).

A preparação da superfície de envelope motor foguete tem por objetivo principal, além da remoção da camada de óxidos, a colagem (aderência) de materiais poliméricos específicos, que servirão como isolantes térmicos, impedindo que as altas temperaturas (3.200K) provenientes da queima do propelente atinja a estrutura metálica. A qualidade da adesão nessa interface metal/isolante térmico desempenha um papel fundamental, uma vez que, havendo uma falha nesta interface (descolagem), as altas temperaturas provenientes dos gases da queima do propelente atingirão a estrutura metálica provocando o rompimento (colapso) do propulsor, em razão das perdas das propriedades mecânicas do aço, que não terá mais condições de suportar as tensões resultantes da combustão do propelente. A integridade dessa região interfacial garante que todo o conjunto depois de aderido um ao outro suporte as tensões impostas tais como: dilatações e contrações do bloco de propelente, a aceleração durante o lançamento e as vibrações mecânicas durante o tempo de voo. A qualidade da adesão nessa interface é um dos itens que define a confiabilidade do envelope motor foguete (MORAES, et al., 2005)

O processo de colagem de isolantes térmicos pode ser considerado como um processo “especial”, isto é, seus resultados são verificáveis somente ao seu final, não havendo possibilidade de avaliação parcial dos resultados do produto e de intervenção no processamento do mesmo (SAKAI, et al., 2006). Para os envelopes motores foguete do Programa Espacial Brasileiro, logo após a etapa de tratamento térmico é aplicado o tratamento superficial com o objetivo de remover a camada de óxidos e preparar o substrato metálico para a aderência de primer e materiais poliméricos específicos. Todos os tratamentos superficiais aplicados ao envelope motor foguete são mecânicos, o tratamento superficial químico não é utilizado porque pode provocar a fragilização do aço.

Dessa forma, os óxidos formados sobre a superfície interna dos envelopes motores são removidos por jateamento abrasivo a seco com granalhas de aço de perfil angular “*Grit G-50*” especificada de acordo com a Norma SAE-J444 (SAE-J444, 1993). Em adição, o jateamento abrasivo promove na superfície do aço um padrão de ancoragem (macrorrugosidade superficial) adequado para propiciar uma boa aderência ao substrato metálico (chapa de aço do envelope motor).

Em seguida é efetuada uma operação de desengraxamento a quente da superfície interna do envelope motor com solvente clorado para remoção de possíveis resíduos, tais como óleo, graxa, partículas de granalhas e umidade da

chapa metálica que poderiam interferir negativamente na qualidade da adesão desejada.

2.6.1 Jateamento abrasivo

Descoberto em 1870 pelo americano Benjamin Tilghmann, após este observar uma rajada de vento em sua vidraça. Definiu-se que o jateamento abrasivo é um processo de preparação de superfícies que utiliza o impacto de partículas abrasivas movimentadas em alta velocidade sobre uma superfície, objetivando a remoção da pintura, ferrugem, e demais materiais contaminantes, deixando o substrato pronto para receber um novo tratamento superficial criando um perfil de rugosidade favorável à ancoragem do revestimento a ser aplicado após o jateamento. Dos muitos métodos utilizados, o jateamento abrasivo produz uma preparação de superfície mais uniforme e, por isso, na maioria das vezes é o mais utilizado e também o mais econômico.

A rugosidade provocada pelo abrasivo na superfície pode ser medida e é denominada de perfil de rugosidade ou padrão de ancoragem.

Durante o jateamento, o abrasivo provoca arrancamento de material, causado pelo impacto de suas partículas, com velocidades aproximadas de 300 km/h nos bicos de perfil reto e cerca 700 km/h nos bicos tipo Venturi (GNECCO, et al., 2003), conforme ilustração da Figura 26

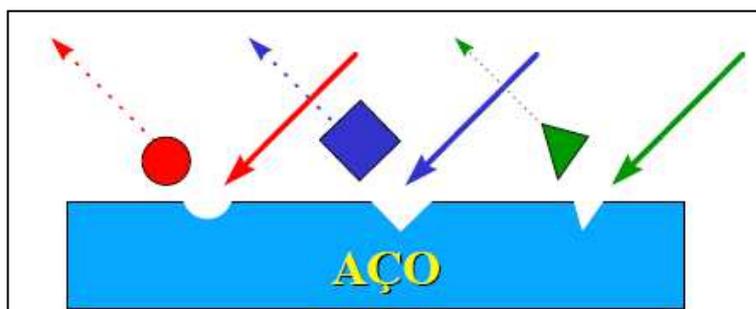


Figura 26 - Esquema de incidência de granalhas na superfície (GNECCO, et al., 2003)

Imediatamente antes de colidirem contra o alvo, as partículas estão dotadas de energia cinética, que é diretamente proporcional à massa da partícula e ao quadrado da velocidade, conforme a Equação 5:

$$E_C = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (\text{Eq.5})$$

A massa de uma partícula esférica é dada pela relação (Equação 6):

$$m = \frac{4}{3} \rho \cdot \pi \cdot R^3 \quad (\text{Eq.6})$$

Portanto, a energia cinética de uma partícula esférica é dada pela relação (Equação 7):

$$E_C = \frac{2}{3} \rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot v^2 \quad (\text{Eq. 7})$$

As equações acima indicam que podem ocorrer variações significativas da energia cinética durante o processo de jateamento com pequenas variações nas quantidades e dimensões das partículas. Considerando-se que a velocidade das partículas, independente de seu tamanho, é mantida fixa, observa-se pela relação acima que a diminuição do raio de uma partícula para a metade de seu valor inicial corresponde a uma diminuição de oito vezes na sua energia cinética (WATANABE, 2008).

As partículas sofrem uma violenta desaceleração no instante do impacto, transformando parte da energia cinética em calor, parte em energia de deformação ou de fratura e parte em trabalho de limpeza, restando ainda uma parcela da energia cinética que não é transformada (parte das granalhas sofrem ricochete). A eficiência dessa conversão de energia cinética em trabalho efetivo de limpeza depende de fatores relacionados ao ângulo de incidência do jato, às características da granalha utilizada, ao tipo da impureza a remover, etc (WATANABE, 2008).

Verifica-se que quanto mais perpendicular for o jato em relação à superfície de trabalho, maior será a componente de energia disponível para o trabalho de quebra das impurezas aderidas à superfície da peça. Neste caso, o acabamento superficial também será mais áspero, pois as granalhas disporão de maior energia para deformar a superfície de trabalho, produzindo relevos mais acentuados (WATANABE, 2008).

A ação do impacto das partículas contra a superfície é considerável, pois consegue remover carepa de laminação, que é um óxido de ferro (Fe_2O_3) com dureza próxima da do carbetto de tungstênio (WC), segundo alguns autores. No impacto, a partícula provoca, além da abrasão, marcas na superfície que ficam com a sua forma. Assim, se a partícula é redonda (*shot*) ou angular (*grit*), pequena ou

grande, a superfície terá um perfil semelhante ao perfil das suas partículas (GNECCO, et al., 2003), conforme Figura 27.

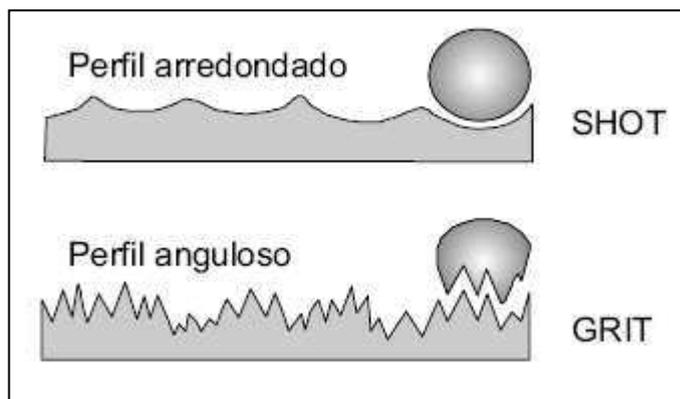


Figura 27 - Perfil de rugosidade em função do formato da granalha de aço (GNECCO, et al., 2003)

A granalha esférica (*shot*) tem, sobre a superfície, o efeito de martelamento, enquanto a granalha angular (*grit*) produz efeito similar ao de uma talhadeira criando perfis pontiagudos (IKK do BRASIL). A granulometria dos abrasivos é fundamental para se obter um determinado perfil de rugosidade. O perfil ideal é aquele situado entre 1/4 e 1/3 da espessura total da camada adesiva (GNECCO, et al., 2003).

Um perfil de rugosidade muito baixo pode proporcionar base insuficiente para aderência, enquanto que um perfil elevado pode resultar na cobertura desigual dos picos mais altos, ocasionando pontos de corrosão em potencial.

O perfil de rugosidade é obtido em função do formato dos grãos dos abrasivos e também, pelo tamanho de suas partículas. A granulometria dos abrasivos é fundamental para se obter um determinado perfil de rugosidade (GNECCO, et al., 2003).

Porém, é preciso selecionar dentre uma gama toda de tamanho de partículas, somente aquelas que possam produzir a rugosidade desejada. Para isto, são utilizadas peneiras com aberturas definidas para classificar a granulometria dos abrasivos. Geralmente são usadas duas peneiras, uma com abertura das malhas maior, para separar as partículas grandes e outra com abertura menor, para deixar passar e descartar as partículas menores, que formam o pó. O material que após o peneiramento fica retido na peneira de baixo, ou seja, a de menor abertura de suas malhas, é o que interessa para o jateamento. Dependendo do par de peneiras selecionado tem-se a granulometria do abrasivo classificado. Pares de peneiras próximas "*fecham*" mais a granulometria e, ao contrário, números de peneiras

distantes “*abrem*” a faixa de granulometria. O Quadro 01 mostra a granulometria do abrasivo em função do perfil de rugosidade média (R_a) desejado obtido com pressão de jateamento de 0,7MPa, tanto para areia como para as granalhas de aço.

Quadro 1- Perfil de rugosidade em função da granulometria do abrasivo (GNECCO, et al., 2003)

ABRASIVO	CLASSIFICAÇÃO PENEIRAS	RUGOSIDADE R_a (μm)
Areia		
Muito Fina	80 - 100	20
Fina	40 - 80	30
Média	18 - 40	45
Grossa	12 - 50	55
Granalha de Aço (Shot)	Redonda	
S-110	30	25
S-170	20	35
S-230	18	65
S-330	16	70
S-390	14	75
Granalha de Aço (Grit)	Angular	
G-50	25	70
G-40	18	75
G-25	16	80
G-16	12	150

Para os envelopes motores de 1.000 mm de diâmetros foi desenvolvido um equipamento de jato especial para aplicar o jateamento abrasivo a seco com granalha de aço de perfil angular (grit) no interior dos envelopes motores. O esquema do processo utilizado nesse equipamento é mostrado na Figura 28.

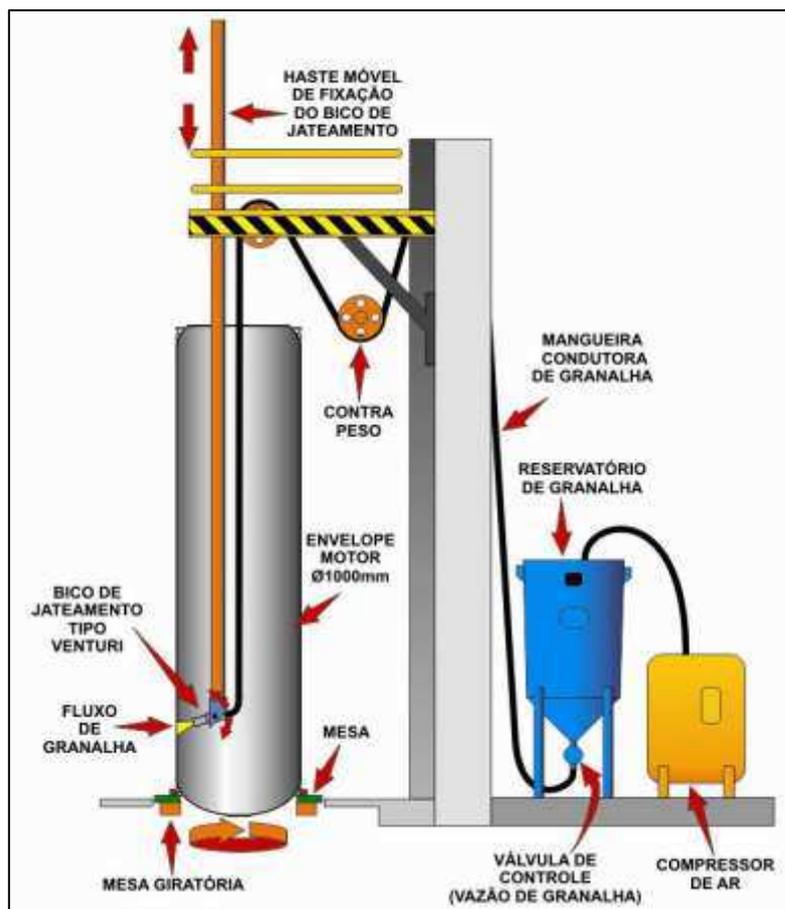


Figura 28 - Processo utilizado para aplicação do jateamento na parte interna do envelope motor de 1.000 mm de diâmetro (Fonte: Autor)

2.6.2 Granalhas de aço fundidas

As granalhas de aço surgiram comercialmente no mercado europeu na década de 50 do século passado, tendo aumentado progressivamente sua aceitação em substituição às areias e aos demais tipos de abrasivos metálicos utilizados para limpeza de superfícies, principalmente, de peças fundidas.

As granalhas são produzidas por atomização do aço no estado líquido, através de um jato de água sobre alta pressão, que em contato com o metal líquido "explode" produzindo gotículas esféricas, que caem num tanque com água, solidificando-se e resfriando-se rapidamente. Em seguida, as esferas (granalhas) são retiradas do tanque, secas e pré-classificadas em função de seus diâmetros, e tratadas termicamente (temperadas) em fornos com atmosfera protetora (WATANABE, 2008). As granalhas grandes são quebradas gerando as granalhas angulares, podendo ser revenidas ou não em baixas temperaturas.

As granalhas esféricas menores são, então, revenidas de acordo com a sua classe de dureza, obtendo-se desta forma granalhas para jateamento (*grit*) ou para "*shot peening*". As granalhas esféricas comuns para jateamento são, normalmente, revenidas para alcançarem durezas na faixa de 40,0 a 50,0 HRC, conforme estabelece a norma SAE J827 (2005). Essa norma especifica para as granalhas, aços hipereutetóides com teores de carbono entre 0,85% e 1,20%, manganês entre 0,35% e 1,20%, e silício entre 0,40% e 1,50%, além dos elementos residuais fósforo e enxofre que não podem ultrapassar o limite de 0,050%.

3. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Com o propósito de realizar um experimento de campo com uma abordagem quantitativa, explorando todas as possibilidades do processo atual de tratamento superficial mecânico de jateamento abrasivo a seco com granalha de aço de perfil angular a que são submetidos os envelopes motores foguetes de 1.000 mm de diâmetro, como primeira etapa da preparação da superfície para a aderência de isolantes térmicos e tendo como propósito principal verificar a hipótese de se obter na interface colada metal/isolante térmico para o aço Maraging 18Ni300 o mesmo nível de resistência mecânica adesiva alcançada atualmente na interface colada metal/isolante térmico para o aço 300M-ESR, utilizando-se, a princípio, dos mesmos equipamentos e parâmetros de processos.

Com esse intuito foram projetados e construídos dispositivos mecânicos de ensaios capazes de reproduzirem nas amostras jateadas o mesmo nível de rugosidade superficial obtida na superfície dos envelopes motores foguetes.

Os parâmetros do processo que sofreram variação durante os experimentos com as amostras de aço 300M-ESR e Maraging 18Ni300 são: o ângulo de incidência de granalha, a vazão de granalha e a condição da granalha. Esses parâmetros também chamados de variáveis intervenientes do processo foram cuidadosamente escolhidos tendo em vista os resultados procurados e as características dos equipamentos disponíveis para aplicação do processo de jateamento abrasivo a seco com granalha de aço angular nos envelopes motores foguetes.

Todavia, em razão do alto custo dos materiais utilizados como amostras e de sua escassez, o que inviabiliza a fabricação de uma grande quantidade de amostras para experimentos, e tendo em vista que o foco principal desse trabalho (hipótese científica) é fazer uma avaliação do processo atual, visando sua utilização no aço Maraging 18Ni300 foram fabricadas três amostras de aço (réplicas) para cada um dos experimentos, número suficiente para a obtenção de resultados com um grau de confiabilidade aceitável, sendo posteriormente utilizado o valor médio da rugosidade superficial (variável dependente) encontrada nas três amostras como o valor obtido para cada experimento realizado.

Uma vez confirmada a hipótese científica, se justificaria uma nova pesquisa com a fabricação de uma quantidade maior de amostras para serem jateadas nas condições que atendam aos critérios da hipótese inicial (superfícies de aço 300M-

ESR e Maraging 18Ni300 jateadas que apresentem resistência mecânica semelhantes na interface colada metal/isolante térmico) e com isso diminuir a variância nos dados obtidos, aumentando assim a confiabilidade nos resultados encontrados.

Inicialmente, realizou-se uma ampla série de experimentos de jateamento abrasivo a seco com granalha de aço angular nas amostras de aço, utilizando-se dos dois equipamentos de jateamento existentes para essa finalidade, onde três variáveis intervenientes do processo: ângulo de incidência, a vazão de granalha e a condição da granalha, sofreram variações com o intuito de se pesquisar a sua influência sobre a variável dependente ou variável de resposta.

Antes das amostras serem submetidas aos ensaios experimentais de jateamento abrasivo a seco com granalha de aço angular, foi realizada uma medição da rugosidade superficial na condição após tratamento térmico com o objetivo de verificar o nível de rugosidade inicial já existente nas amostras de aço.

Após a realização dos ensaios experimentais de jateamento abrasivo a seco, procedeu-se à medição da rugosidade superficial em todas as amostras de aço.

3.1 Planejamento dos ensaios experimentais

O planejamento dos ensaios experimentais tem por objetivo desenvolver o esquema e a teoria necessária para verificação da hipótese científica, possibilitando que os resultados obtidos possam ser analisados através de métodos estatísticos, permitindo a elaboração de conclusões objetivas, além de minimizar o número de ensaios a serem realizados e maximizar a quantidade de informações extraídas, com confiança estatística, tendo em vista que o número de ensaios deve ser adequado de modo a minimizar os erros experimentais, mas também deve contribuir para a viabilidade econômica e prática da experimentação.

Um experimento planejado é um teste ou uma série de testes estabelecidos com critérios científicos e estatísticos no qual se induz mudanças deliberadas nas variáveis intervenientes do processo ou sistema, de tal forma que seja possível observar e identificar os efeitos de cada variável isoladamente e os efeitos das suas interações sobre as variáveis de respostas ou nas variáveis dependentes, dessa forma um experimento somente estará planejado quando estiverem sido definidos os seguintes itens (TAVARES, 2002):

- a) a unidade experimental;
- b) escolha das variáveis (fatores de influência) e das faixas de valores em que essas variáveis serão avaliadas;
- c) as regras que associam as unidades experimentais a cada uma das combinações entre os níveis de todos os fatores envolvidos no experimento; e
- d) a escolha adequada da variável de resposta, de modo que garanta a objetividade na análise dos resultados obtidos.

3.1.1 A unidade experimental

A unidade experimental é determinada pela própria natureza do material experimental, no caso dos experimentos em questão, a unidade experimental é a própria amostra de aço que sofrerá tratamento superficial de jateamento abrasivo a seco com granalha de aço angular em sua superfície.

3.1.2 Escolha dos fatores e seus respectivos níveis

Com o objetivo de tornar mais produtivo os experimentos foi estabelecido um conjunto inicial com número reduzido de ensaios (poucas variáveis intervenientes e poucos níveis de avaliação), reduzindo-se o número total de ensaios.

A técnica adotada nos experimentos foi o de uso de réplicas que consiste na repetição de um ensaio em condições preestabelecidas, permitindo obter-se uma estimativa de como o erro experimental afeta os resultados dos ensaios e se esses resultados são estatisticamente diferentes. Essa técnica também permite verificar qual a influência de uma determinada variável sobre o comportamento de um processo, quando a comparação é feita pela média das amostras.

Nos experimentos em questão foram adotados dois níveis para cada fator, de um total de três fatores ou variáveis intervenientes do processo que foram previamente escolhidas. As variáveis escolhidas e os respectivos níveis estão detalhadas na Tabela1.

Tabela 1- Relação de fatores de Influência e Níveis de avaliação pesquisados nos experimentos

<u>Variáveis de Influência</u> (Fator)	<u>Níveis</u>	
Condição da granalha	Usada	Nova
Vazão de granalha	6 voltas	8 voltas
Ângulo de incidência	30°	60°

As variáveis escolhidas para esta pesquisa foram: a condição da granalha que esta diretamente relacionada com a faixa granulométrica dos grãos de abrasivo; a vazão de granalha que é o volume ou a massa total de granalhas expelida pelo bico de jateamento na unidade de tempo, (nos experimentos em questão essa variável foi medida diretamente na válvula dosadora do reservatório de granalhas em número de voltas completas, por ser esse procedimento uma prática usual dos operadores de jato) e o ângulo de incidência, que é o ângulo de incidência dos grãos de abrasivo sobre a superfície a ser jateada, medido entre o plano da superfície e a linha de inclinação do bico de jateamento. Para todas estas variáveis foram utilizados dois níveis de avaliação.

A escolha das variáveis acima foi determinada em função das características operacionais dos equipamentos disponíveis para aplicação do processo de tratamento superficial de jateamento abrasivo a seco com granalha de aço angular nos envelopes motores foguetes de 1.000 mm de diâmetro. Os níveis foram escolhidos de forma a cobrirem uma ampla faixa de valores, de modo a facilitar a percepção de alterações na variável de resposta (variável dependente) que na presente pesquisa é o perfil de rugosidade superficial obtida após o jateamento das amostras de aço.

O referencial de partida para a escolha dessa faixa de valores foram os parâmetros atuais tidos como padrão no processo de jateamento abrasivo a seco com granalha de aço angular que estão detalhados na Tabela 2.

Tabela 2 – Fatores de Influência e Níveis do processo atualmente em uso

Variáveis de Influência (Fator)	Nível
Condição da granalha	Nova
Vazão de granalha	6 voltas
Ângulo de incidência	60°

3.1.3 Delineamento dos experimentos

O tamanho da amostra foi determinado em função do número de combinações entre os níveis de todos os fatores envolvidos nos experimentos. Por razões operacionais, os ensaios experimentais foram realizados em dois equipamentos tecnicamente semelhantes, mas que possuem características operacionais distintas, denominados, respectivamente, de equipamento 1 e equipamento 2. Isso foi necessário para verificar a influência da condição da granalha sobre a variável dependente, ocasionada pela fragmentação contínua da granalha após impacto com a amostra durante o processo de jateamento abrasivo, como pode ser visto na Figura 29.

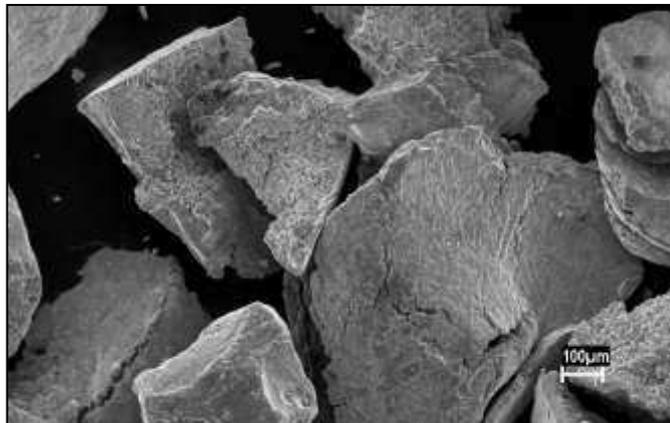


Figura 29 - Aspecto do grão de abrasivo fragmentado após impacto com a superfície jateada. Fotomicrografia de MEV com aumento de 200x (Fonte: Autor)

Isso ocorre porque as partículas de abrasivo sofrem uma violenta desaceleração no instante do impacto, transformando parte da energia cinética em calor, parte em energia de deformação ou de fratura e parte em trabalho, restando ainda uma parcela da energia cinética que não é transformada (parte das granalhas sofrem ricochete).

Em virtude dos equipamentos atuais possuírem um sistema de recuperação automática da granalha com piso gradeado, elevadores de canecas e sistema de

purificação, a granalha passou a ser utilizada inúmeras vezes no processo e, com isso, a sua faixa granulométrica também passou a sofrer uma variação contínua com influência direta sobre o perfil da rugosidade superficial. A granulometria do abrasivo é fundamental para se obter um determinado perfil de rugosidade.

Dessa forma, no equipamento 1 foram realizados os experimentos com granalha de aço na condição “nova” (Figura 30), isto é, granalhas de aço de perfil angular que estavam sendo utilizadas pela primeira vez em um tratamento superficial de jateamento abrasivo e no equipamento 2 os experimentos com granalha de aço na condição “usada” (Figura 31), isto é, granalhas de aço de perfil angular recuperada de sucessivos tratamentos superficiais de jateamento abrasivo, com aproximadamente três anos de uso . Sendo assim, cada equipamento avaliou dois fatores de influência a dois níveis, com ensaios em mais duas réplicas, totalizando quatro ensaios e doze amostras para cada aço pesquisado.

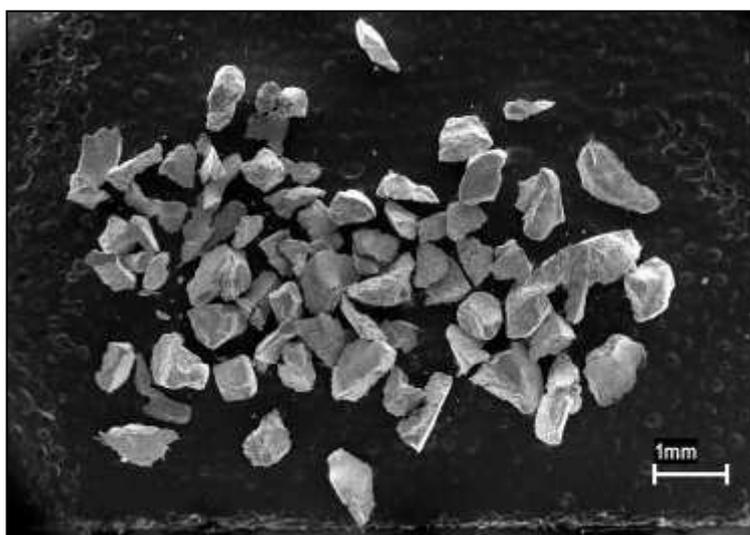


Figura 30 - Grãos de granalha de aço angular “Nova” com aumento de 29x no MEV (Fonte: Autor)

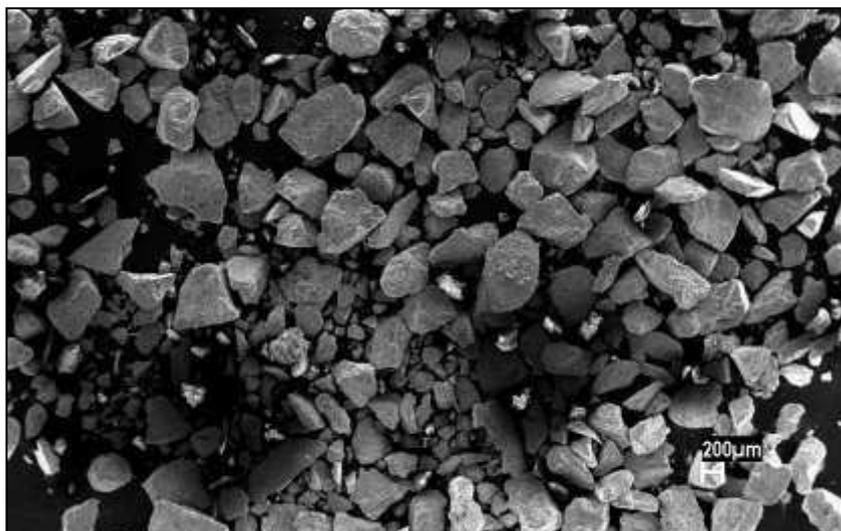


Figura 31 - Grãos de granalha de aço angular “Usada” com aumento de 40x no MEV (Fonte: Autor)

No processo atual de tratamento superficial de jateamento abrasivo a seco com granalha de aço angular nos envelopes motores foguetes de 1.000 mm de diâmetro, o equipamento 1 é utilizado no jateamento abrasivo do corpo do envelope motor enquanto o equipamento 2 é utilizado para jateamento abrasivo na tampa do envelope motor.

Nas Figuras 32 e 33 estão detalhadas as representações esquemáticas dos experimentos realizados com as amostras de aço 300M-ESR e Maraging18Ni300 nos equipamentos 1 e 2. Pode-se observar que o planejamento experimental consegue organizar os ensaios de modo a experimentar todas as combinações possíveis das duas variáveis a dois níveis, totalizando quatro ensaios e doze amostras.

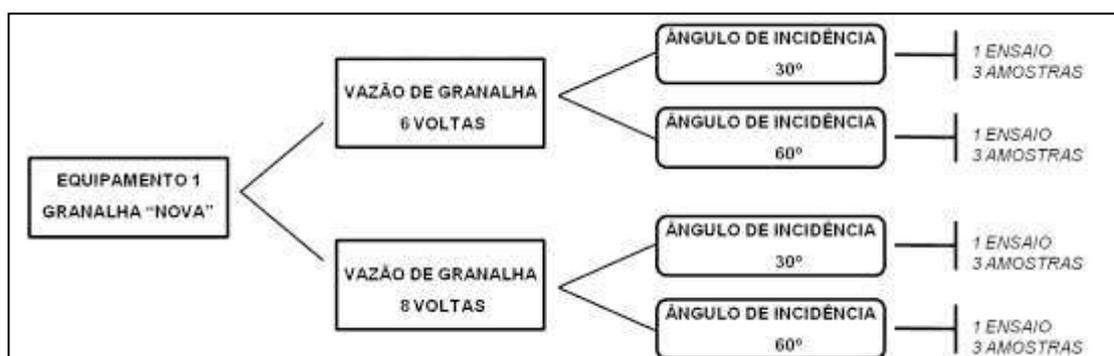


Figura 32- Representação esquemática do planejamento experimental para o equipamento 1

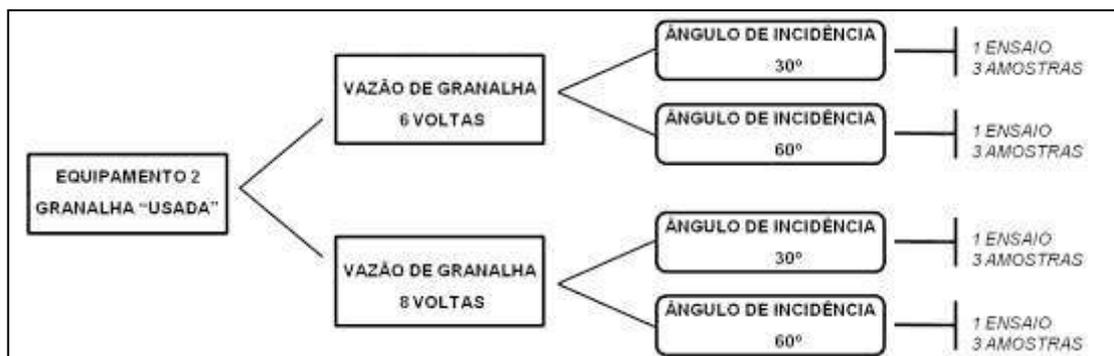


Figura 33 - Representação esquemática do planejamento experimental para o equipamento 2

Portanto, o número total de amostras dos dois aços para a realização de todos os experimentos, nos dois equipamentos foi de quarenta e oito amostras, sendo vinte e quatro em aço 300M-ESR e vinte e quatro em aço Maraging18Ni300.

3.1.4 Variável dependente em análise

As medidas realizadas nas unidades experimentais, após serem submetidas aos experimentos, constituem os valores da variável dependente ou variável de resposta. O critério principal para essa escolha é de que o erro experimental de medida da variável de resposta seja mínimo, permitindo a análise estatística dos dados, com um número mínimo de réplicas.

Nos experimentos realizados com amostras de aço 300M-ESR e Maraging18Ni300, a variável dependente em análise foi a rugosidade superficial medida através de um rugosímetro com apalpador. A medida da rugosidade é um método empregado para caracterizar a superfície dos materiais.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Essa etapa é extremamente importante, pois garante a validade experimental, exigindo-se conhecimento dos instrumentos, equipamentos e métodos de controle e monitoramento. O enfoque principal dos experimentos, como já foi mencionado, é verificar, pela medida de rugosidade superficial (Ra) das amostras jateadas, a existência de condições no processo atual de preparação de superfície para aderência de isolantes térmicos em envelopes motores foguetes de 1.000 mm de diâmetros, que resultem em um nível de resistência mecânica adesiva na interface colada metal/isolante térmico para o aço Maraging 18Ni300 igual ou superior ao obtido atualmente para a interface colada com o aço 300M-ESR.

Para isso, foram construídos dispositivos que possibilitassem ensaios das amostras nos equipamentos 1 e 2, tendo em vista os resultados procurados e o planejamento experimental estabelecido anteriormente. A seguir, será descrita em detalhes a execução dos experimentos nos dois equipamentos de tratamento superficial de jateamento abrasivo a seco com granalha de aço de perfil angular.

4.1 Execução dos experimentos no equipamento 1 de jateamento abrasivo

O equipamento 1 tem como característica principal um sistema de operação do bico de jateamento que é semiautomático, possibilitando a aplicação do processo de tratamento superficial de jateamento abrasivo a seco com granalha de aço angular no interior do envelope motor foguete. Além disso, esse sistema permite o controle com boa precisão ($\pm 5^\circ$) do ângulo de incidência da granalha sobre a superfície a ser jateada.

Para executar os experimentos de jateamento abrasivo no equipamento 1 foi necessário construir um dispositivo de ensaio que permitisse reproduzir nas amostras de aço 300M-ESR e Maraging 18Ni300 o mesmo nível de rugosidade superficial obtida na superfície dos envelopes motores foguetes de 1.000 mm de diâmetro, quando da realização da primeira etapa de preparação da superfície do aço para colagem de isolantes térmicos.

Para a construção do dispositivo foi utilizada parte da carcaça de um envelope motor foguete de 1.000 mm de diâmetro. A parte dianteira dessa carcaça, onde se encontra a região do ignitor, foi utilizada para fixação no equipamento de jateamento após operação de corte com maçarico, ficando a fixação do dispositivo na mesa

giratória do equipamento de jato exatamente igual à fixação dos envelopes motores, como pode ser visto na Figura 34.



Figura 34 - Dispositivo de ensaio de jateamento utilizado para o equipamento 1 fixado na mesa giratória (Fonte: Autor)

Para a fixação das amostras foi utilizada uma prancha de madeira compensada nas dimensões de 12 cm x 20 cm, onde as duas amostras, sendo uma de aço 300M-ESR e a outra de aço Maraging 300, foram fixadas uma ao lado da outra, conforme mostrado na Figura 35.



Figura 35 - Detalhe da fixação das amostras no equipamento 1 (Fonte: Autor)

A realização dos experimentos no equipamento 1 ocorreu conforme a sequência detalhada na Tabela 3. Com o propósito de garantir que as condições de aplicação do tratamento superficial de jateamento abrasivo a seco seriam exatamente iguais nos dois aços, decidiu-se pelo jateamento simultâneo das duas amostras (aço

300M-ESR e aço Maraging 18Ni300) em cada um dos doze experimentos executados, como pode ser observado na Figura 36.

Tabela 3 - Sequencia de experimentos realizados no equipamento 1

Experimento	Vazão de granalhas	Ângulo de incidência	Quantidade de Amostras	
			300M	Maraging300
1	6 Voltas	60°	1	1
2	8 Voltas	60°	1	1
3	8 Voltas	30°	1	1
4	6 Voltas	30°	1	1
5	6 Voltas	60°	1	1
6	8 Voltas	60°	1	1
7	6 Voltas	30°	1	1
8	8 Voltas	30°	1	1
9	6 Voltas	60°	1	1
10	8 Voltas	60°	1	1
11	8 Voltas	30°	1	1
12	6 Voltas	30°	1	1



Figura 36 - Amostras de aço 300M-ESR e Maraging 300 sendo jateadas simultaneamente
(Fonte: Autor)

O equipamento 1 possui como característica operacional um bico de jateamento dotado de um mecanismo que permite a regulagem do ângulo de incidência das granalhas com boa precisão, além disso, ele está fixado em uma haste metálica que permite movimento somente no plano vertical, a movimentação no plano horizontal está impedida, como pode ser observado na Figura 37.



Figura 37 - Detalhe do mecanismo do bico de jateamento pertencente ao equipamento 1
(Fonte: Autor)

Nesse equipamento de jateamento abrasivo é a peça quem sofre um movimento de rotação em torno do bico de jateamento. Esse equipamento é utilizado para fazer o jateamento interno dos envelopes motores para colagem de isolantes térmicos e a principal vantagem desse sistema, além de tornar possível a operação de jateamento interno nos envelopes motores, é um controle preciso do ângulo de incidência das granalhas e da distância de aplicação do jateamento até a superfície do envelope motor foguete.

O tratamento superficial de jateamento abrasivo a seco foi realizado com granalha de aço de perfil angular GH50 na condição “nova”, pressão de jateamento igual a 0,70 MPa, rotação da mesa giratória em 17,8 rpm (botão de controle na posição 8), bico de jateamento de diâmetro 12,0 mm tipo venturi longo, velocidade de subida do bico de jateamento em 126,0 mm/min (botão de controle na posição 2), tendo como aspecto visual de limpeza Sa3, ao metal branco, sendo que as duas outras principais variáveis intervenientes do processo (vazão de granalha e ângulo de incidência das granalhas) sofreram variações conforme o estabelecido anteriormente no planejamento experimental, como mostrado na Tabela 3. A distância do bico de jateamento até as amostras foi medido em 312,0 mm para um ângulo de incidência de 30° e 470,0 mm para o ângulo de incidência de 60°.

Os tratamentos tiveram como padrão de limpeza o aspecto visual ao metal branco Sa3, conforme Norma ISO 8501-1 (ISO 8501-1, 2007), que consiste na remoção de todas as impurezas da superfície, deixando-as completamente limpas com cor cinza muito claro e uniforme, sem quaisquer manchas ou raias.

Após o tratamento superficial de jateamento abrasivo a seco as amostras (Figura 38) foram limpas com 1,1,1 tricloroetano para a remoção dos resíduos de granalha conforme Norma ASTM – D 4126-84 (ASTM, 2002).

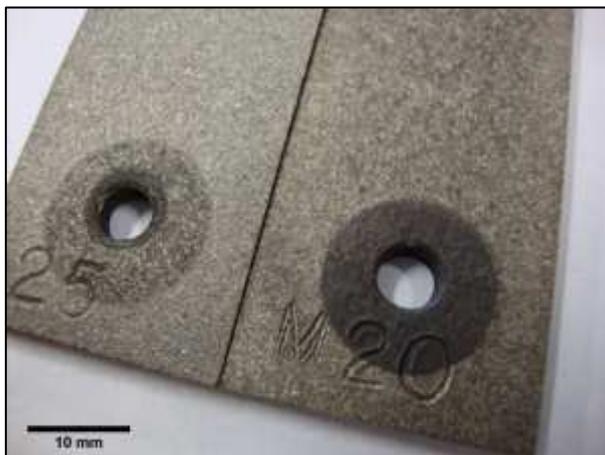


Figura 38 - Aspecto da superfície das amostras após tratamento superficial de jateamento abrasivo a seco com granalha de aço GH50 e limpeza com 1,1,1 tricloroetano (Fonte: Autor)

O tricloroetano (metilclorofórmio) está entre os menos tóxicos dos solventes clorados utilizados em processos de limpeza, o chamado “*Solvent Cleaning*”, sendo utilizado a partir de um grau especialmente “*inibido*” para desengraxamento a vapor dos envelopes motores foguete do Programa Espacial Brasileiro, em substituição ao tricloroetileno que é significativamente mais tóxico (MOREIRA, 1997).

4.2 Execução dos experimentos no equipamento 2 de jateamento abrasivo

A realização dos experimentos no equipamento 2 ocorreu conforme a sequência detalhada na Tabela 4.

Tabela 4 - Sequência de experimentos no equipamento 2

Experimento	Vazão de granalhas	Ângulo de incidência	Quantidade de Amostras	
			300M	Maraging300
1	6 Voltas	60°	3	3
2	6 Voltas	30°	3	3
3	8 Voltas	60°	3	3
4	8 Voltas	30°	3	3

A redução no número de experimentos foi devida à característica operacional do equipamento 2, onde o bico de jateamento (Figura 39) é operado manualmente pelo operador, ao contrário do equipamento 1 que dispõe de um bico de jateamento fixo dotado de um sistema que permite a regulagem do ângulo de incidência das

granalhas. Em razão disso, foi necessário construir um dispositivo para simular no equipamento 2 as mesmas condições de ensaios (ângulos de 30° e 60° com as respectivas distâncias de 312,0 mm e 470,0 mm das amostras até o bico de jateamento) realizadas no equipamento 1.

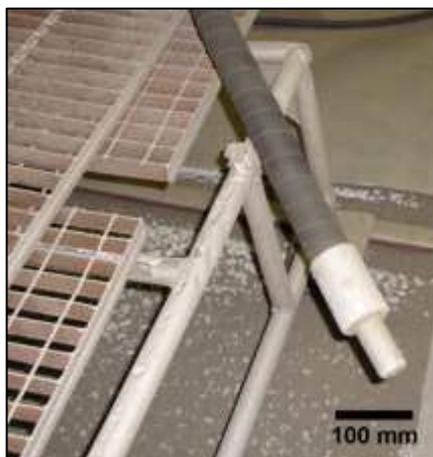


Figura 39 - Bico de jateamento do equipamento 2 (Fonte: Autor)

Porém, para esse dispositivo de ensaio construído não houve a necessidade de repetir os experimentos três vezes para cada condição ensaiada com a finalidade de prevenir a ocorrência de erros sistemáticos introduzidos durante a regulagem do ângulo do bico de jateamento (ângulo de incidência das granalhas), uma vez que, nesse dispositivo de ensaio, o bico de jateamento permanecerá posicionado em um referencial fixo em relação às amostras durante o tempo de aplicação do processo de jateamento abrasivo nas amostras de aço, conforme pode ser observado na Figura 40.

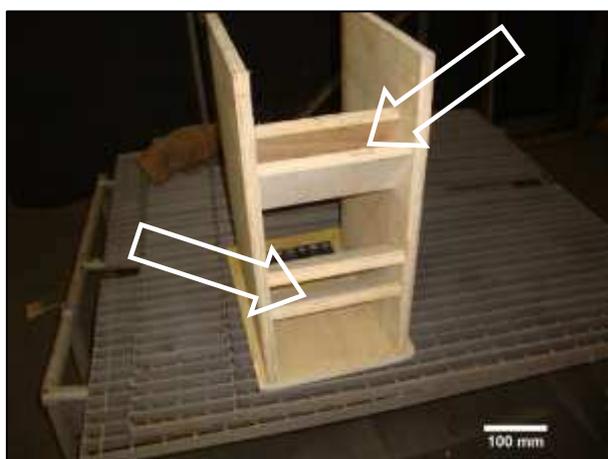


Figura 40 - Dispositivo de ensaio para o equipamento 2, indicando o local de posicionamento do bico de jateamento para o ângulo de 30° e 60° (Fonte: Autor)

Foi seguida a mesma metodologia adotada para os experimentos realizados no equipamento 1, ou seja, aplicar o tratamento superficial de jateamento abrasivo nas amostras de aço 300M-ESR e Maraging 18Ni300 simultaneamente, com o propósito de garantir que as condições de aplicação do tratamento superficial de jateamento abrasivo seriam exatamente iguais nos dois aços. Para isto, as amostras foram fixadas na base do dispositivo uma ao lado da outra, alternando amostras de aço 300M-ESR com amostras de aço Maraging 18Ni300, totalizando um grupo de seis amostras, conforme Figura 41.

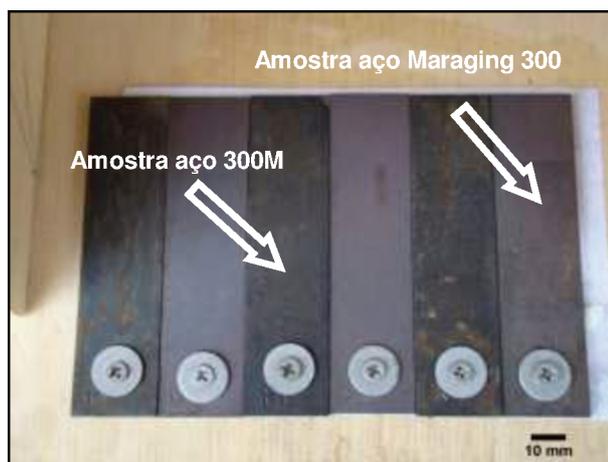


Figura 41- Esquema de posicionamento das amostras de aço no equipamento 2 (Fonte: Autor)

Os experimentos foram realizados com granalha de aço de perfil angular GH50 na condição “usada”, pressão de jateamento igual a 0,70 MPa, bico de jateamento de diâmetro 12,0 mm tipo venturi longo, tempo de exposição ao jateamento de 50 segundos (Figura 42), tendo como aspecto visual de limpeza Sa3, ao metal branco, sendo que as duas outras principais variáveis intervenientes do processo (vazão de granalha e ângulo de incidência da granalha) sofreram variações conforme o estabelecido anteriormente no planejamento experimental, como pode ser observado na Tabela 4. A distância do bico de jateamento até as amostras foi medido em 312,0 mm para um ângulo de incidência de 30° e 470,0 mm para o ângulo de incidência de 60°.



Figura 42 - Aspecto das amostras após o tratamento superficial de jateamento abrasivo
(Fonte: Autor)

Os tratamentos tiveram como padrão de limpeza o aspecto visual ao metal branco Sa3, conforme Norma ISO 8501-1 (ISO 8501-1, 2007).

Após o tratamento superficial de jateamento abrasivo a seco, as amostras (Figura 43) foram limpas com 1,1,1 tricloroetano para a remoção dos resíduos de granalha conforme Norma ASTM – D 4126-84 (ASTM, 2002).

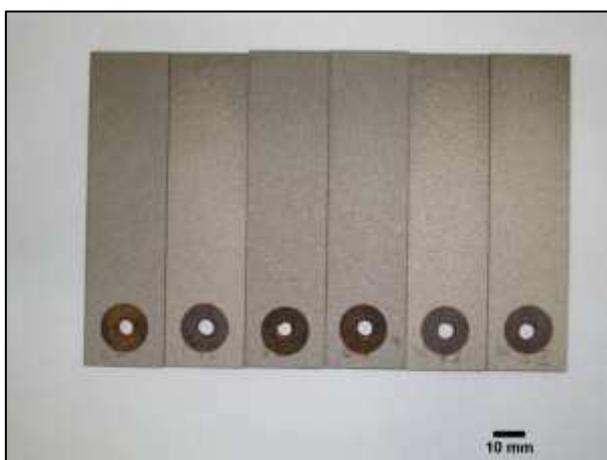


Figura 43 - Aspecto das amostras após limpeza com solvente clorado (Fonte: Autor)

No processo atual de preparação de superfície para colagem de isolantes térmicos nos envelopes motores, o equipamento 2 é utilizado para aplicar o tratamento superficial de jateamento abrasivo a seco na tampa traseira, peça pertencente ao conjunto do envelope motor foguete à qual é acoplada a tubeira (garganta) para escape dos gases provenientes da queima do propelente sólido.

4.3 Medida da rugosidade superficial

A rugosidade superficial é quantificada por parâmetros medidos ao longo de uma linha hipotética. Estes parâmetros da rugosidade são usados para classificar as heterogeneidades superficiais como ondulações e variações em relação a um perfil.

Para a análise da superfície das amostras jateadas nos experimentos foi adotado o parâmetro de rugosidade média (Ra - Roughness Average) que quantifica a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (y_i), dos pontos de perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição conforme ilustração da Figura 44.

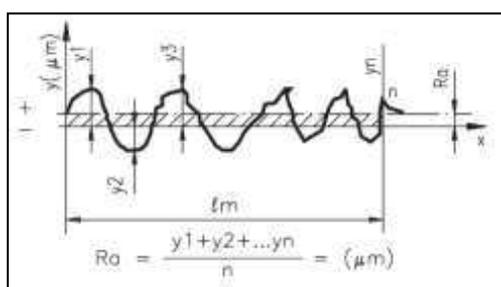


Figura 44-Esboço representativo da rugosidade média–Ra (CAMARGO, 2002)

O parâmetro de rugosidade média Ra (μm) é o parâmetro mais comum utilizado na análise de tratamentos superficiais, atuando como parâmetro de controle de processo.

4.3.1 Calibração do rugosímetro

A medida da rugosidade superficial das amostras de aço foi realizado por meio de um equipamento rugosímetro Taylor-Hobson, modelo Surtronic 3P, com apalpador com ponta de Titânio (Ti), conforme Figura 45. O espaço percorrido pelo apalpador foi de 7,0 mm, conforme estipulado pela Norma ABNT 4288 (ABNT NBR ISO 4288, 2008).



Figura 45 - Modelo de rugosímetro utilizado para a medida da rugosidade superficial nas amostras de aço (Fonte: DCTA/IAE)

Foi adotado como procedimento de ensaio realizar a calibração do rugosímetro através de um bloco padrão devidamente aferido (Figura 46), antes de iniciar uma nova sequência de medidas de rugosidade na superfície das amostras de aço.



Figura 46- Procedimento de calibração do rugosímetro através de um bloco padrão aferido (Fonte: DCTA/IAE)

4.3.2 Medição da rugosidade superficial

O procedimento empregado para realizar o controle da rugosidade na superfície tratada das amostras de aço consistiu na realização de seis medidas de rugosidade, sendo três medidas no eixo longitudinal e mais três medidas no eixo transversal de cada uma das amostras, com espaçamentos iguais entre elas, de modo a cobrir toda a extensão da amostra, conforme pode se observado nas Figuras 47 e 48, sendo adotado o valor médio das medições como o valor da rugosidade superficial da amostra.



Figura 47 - Apalpador do rugosímetro varrendo a superfície tratada da amostra no seu eixo longitudinal, onde são realizadas as três medidas de rugosidade com espaçamentos iguais entre elas (Fonte: Autor)



Figura 48 - Apalpador do rugosímetro varrendo a superfície tratada da amostra no seu eixo transversal, onde serão realizadas três medidas de rugosidade com espaçamentos iguais entre elas (Fonte: Autor)

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Materiais utilizados

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram fornecidos pelo Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), pertencente ao Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA) do Comando da Aeronáutica, e produzidos pela Eletrometal Aços Finos S. A., atual Villares Metals. Trata-se de dois aços de ultra-alta-resistência (300M-ESR e Maraging18 Ni300) utilizados na indústria aeronáutica, automobilística e nuclear entre outras.

Esses aços foram tratados termicamente para atingirem valores de resistência à tração da ordem de 1.850,0 MPa, mesmo nível de resistência à tração exigido para os envelopes motores foguetes de 1.000 mm de diâmetro. As análises químicas foram feitas no Laboratório de Análises Químicas da Divisão de Materiais do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE).

5.1.1 Aço 300M-ESR

O aço 300M-ESR é classificado como um aço de ultra-alta-resistência e baixa liga. É um aço AISI 4340 modificado com Silício (Si), Vanádio (Va) e um conteúdo levemente mais alto de Carbono (C) e Molibdênio (Mo). Possui uma boa combinação de resistência, tenacidade, resistência à fadiga e ductilidade. O material utilizado na pesquisa foi fabricado em forno elétrico e refundido a vácuo e posteriormente o lingote sofreu laminação para adquirir a forma de chapa com espessura igual a 3,5 mm.

A composição química (% em massa) do material utilizado nas amostras de aço 300M-ESR está apresentada na Tabela 5. Em anexo relatório de análise química.

Tabela 5 - Composição química em massa do aço 300M-ESR

C	S	P	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	V
0,37	0,002	0,007	1,56	0,74	0,72	1,61	0,31	0,014	0,12

Relatório de análise química 4007- AMR-L/2010 (Anexo I)

A análise química realizada no material da amostra enquadrou o material na composição química do aço 300M-ESR, conforme Relatório de análise química em Anexo I.

Após a realização do tratamento térmico, foi retirado material para a realização de ensaio de dureza.

5.1.2 Aço Maraging 18Ni300

Trata-se de um aço de ultra-alta-resistência em que o endurecimento ou aumento de resistência mecânica não envolve uma reação metalúrgica com o Carbono (C) (CHIAVERINI, 1987). O que ocorre, nesse aço, é um endurecimento de uma matriz martensítica de baixo carbono, pela precipitação de compostos intermetálicos, a uma temperatura de cerca de 480 °C.

Os aços Maraging possuem altos teores de Níquel (Ni), Cobalto (Co) e Molibdênio (Mo) e baixos teores de Carbono (C) e podem adquirir valores de limite de escoamento variando de 1.050 MPa a 2.450 MPa. O material utilizado na pesquisa foi fabricado por fusão em forno de indução a vácuo e posteriormente submetido a um processo de refusão por escora eletrocondutora (ESR).

Esses processos empregados tem a finalidade de refinar a liga, no sentido de obter um aço com as menores quantidades possíveis de elementos residuais e, com isso, garantindo aos aços Maraging uma boa tenacidade (PADIAL, 2002). Após os processos de fusão e refusão, o lingote é laminado para adquirir a forma de chapa com espessura igual a 3,5 mm.

A composição química (% em massa) do material utilizado nas amostras de aço Maraging 18Ni300 está apresentada na Tabela 6. Em anexo relatório de análise química 4008- AMR-L/2010 (Anexo II)

Tabela 6 - Composição química em massa do aço Maraging 18Ni300

C	S	P	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Co	Al	Ti	Ca
< 0,007	< 0,002	< 0,004	< 0,02	0,01	0,06	18,58	4,67	9,35	0,087	0,66	< 0,01

Relatório de análise química 4008- AMR-L/2010 (Anexo II)

A análise química realizada no material da amostra enquadrou o material na composição química do aço Maraging 18Ni300, conforme Relatório de análise química em Anexo II.

Após a realização do tratamento térmico, foi retirado material para a realização de ensaio de dureza.

5.1.3 Partículas abrasivas

No tratamento superficial mecânico de jateamento abrasivo a seco aplicado sobre a superfície das amostras de aço 300M-ESR e Maraging 18Ni300 dos experimentos foram utilizadas granalhas de aço angular GH50 nas condições “nova” e “usada”.

Foram retiradas amostras das granalhas “nova” e “usada” para análise granulométrica visando determinar a distribuição e o diâmetro médio das partículas que as compõem. A análise granulométrica foi realizada no setor de análise granulométrica do Laboratório Instrumental da Divisão de Química (AQI) do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), conforme Relatório PN-103/10 em Anexo III.

Foi utilizada uma máquina vibratória da marca Produtest com tempo de vibração de 20 minutos e intensidade 10, ambiente com umidade controlada (26% a 42%UR), temperatura controlada (22 a 29°C) e conjunto de peneiras com os respectivos números de identificação (04; 06; 11; 14; 17; 19; 22; 24; 26; 28 e 29).

Nas Tabelas 7 e 8 estão os resultados resumidos em termos de frações retidas e passantes referentes as amostras de partículas abrasivas “nova” e “usada”.

Tabela 7 - Granalha de aço de perfil angular GH-50 na condição “nova”

Peneira (malha mm)	%Retida	%Passante
0,85	0,11	99,89
0,60	25,42	74,48
0,43	30,72	43,76
0,36	17,39	26,37
0,30	11,62	14,75
0,25	8,32	6,43
0,21	1,98	4,45
0,15	3,59	0,86
0,11	0,55	0,31
0,09	0,07	0,25
0,08	0,04	0,21
< 0,08	0,21	0,00
Dp= 0,483mm±5µm		

Dp = diâmetro médio (diâmetro correspondente a 40% da fração passante)

Relatório PN-103/10 (Anexo III)

Tabela 8 - Granalha de aço de perfil angular GH-50 na condição "usada"

Peneira (malha mm)	%Retida	%Passante
0,85	0,00	100,00
0,60	16,87	83,13
0,43	39,03	44,11
0,36	17,87	26,24
0,30	10,08	16,16
0,25	7,51	8,65
0,21	1,55	7,09
0,15	4,73	2,37
0,11	1,49	0,87
0,09	0,26	0,61
0,08	0,16	0,46
< 0,08	0,46	0,00

D_p = 0,460mm ± 7μm

D_p= diâmetro médio (diâmetro correspondente a 40% da fração passante)

Anexo III - Relatório PN-103/10

A Figura 49 mostra o gráfico da curva granulométrica para as granalhas de aço de perfil angular "GH-50" na condição "nova" e "usada"

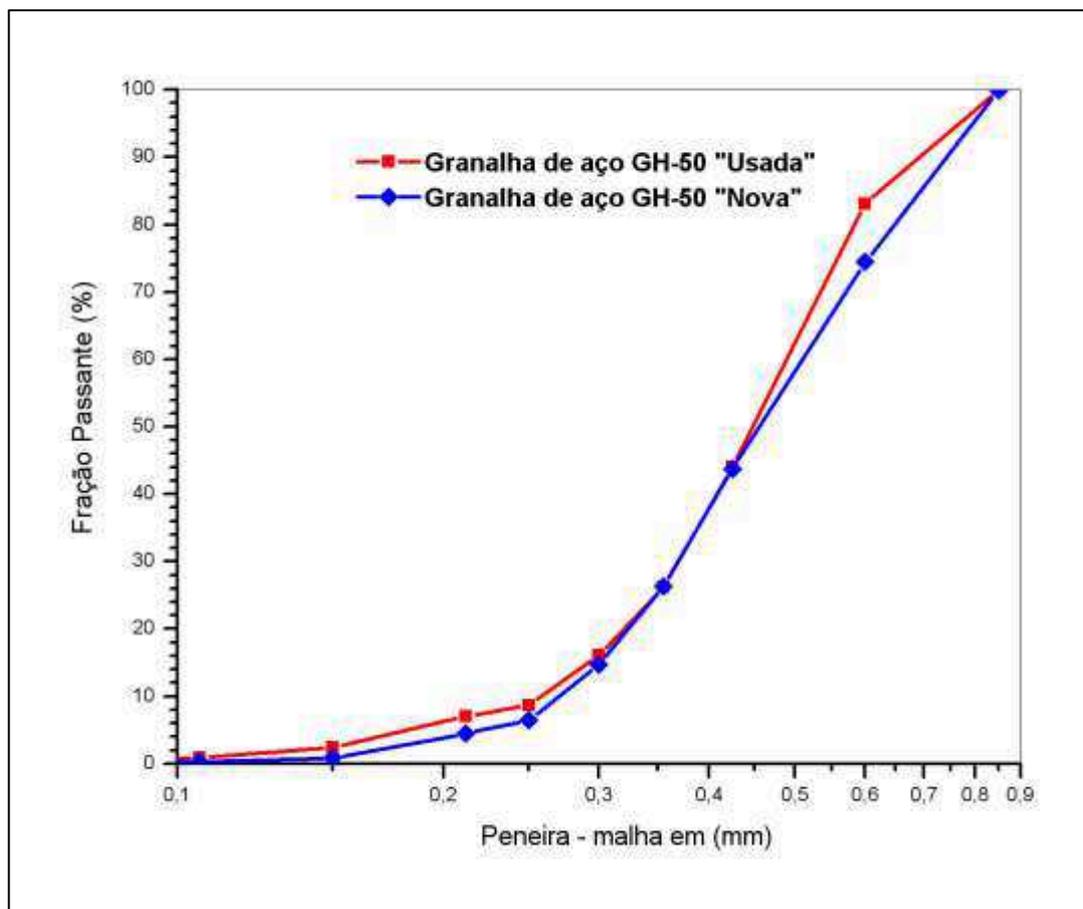


Figura 49 - Gráfico da curva granulométrica das granalhas de aço de perfil angular GH-50 nas condições "nova" e "usada" (Fonte: Autor)

5.2 Preparação das amostras

Foram preparadas amostras em aço 300M-ESR e Maraging 18Ni300 para a realização dos experimentos de acordo com a norma ASTM D 3164-03 (ASTM, 2003), com espessura de 3,0 mm, como mostra a Figura 50.

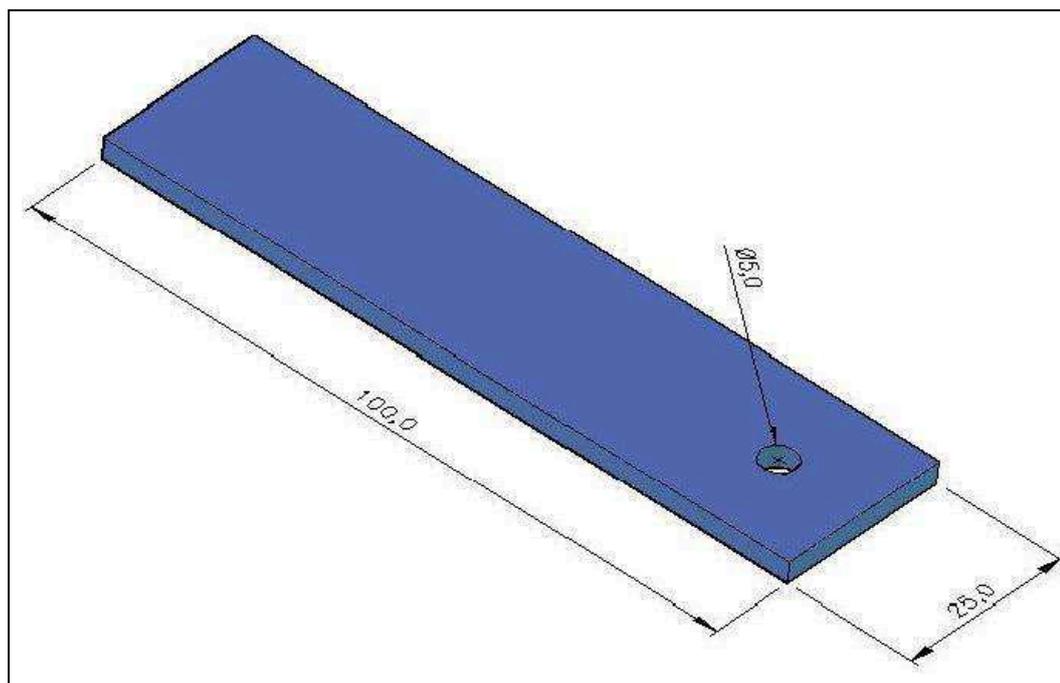


Figura 50 – Amostras de aço para ensaio conforme Norma ASTM D 3164-03 (ASTM, 2003). Unidades em milímetros (mm) (Fonte: Autor)

5.2.1 Tratamento térmico das amostras de aço

As amostras foram submetidas a tratamento térmico para atingirem valores de resistência à tração da ordem de 1.850,0 MPa, mesmo nível de resistência à tração exigido para os envelopes motores foguetes de 1.000 mm de diâmetro. Após o tratamento térmico foi realizado ensaio de dureza (HRC) em algumas amostras (em cinco pontos para cada amostra ensaiada) para verificar a dureza do material após a realização do tratamento térmico conforme Relatório O.S 13/09 em Anexo V. O resultado do ensaio de dureza nas amostras estão detalhados nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 9 - Resultado do ensaio de dureza nas amostras de aço 300M-ESR

Amostra 300M-ESR	<u>Dureza HRC</u>					Desvio Média	Intervalo padrão	Intervalo confiança
	p1	p2	p3	p4	p5			
18	52,0	52,0	52,5	52,5	52,5			
5	53,0	53,0	53,0	53,5	53,0	52,8	0,44	0,24
3	53,0	53,5	53,0	52,5	53,0			

Relatório de dureza O.S 13/09 (AnexoIV)

Tabela 10 - Resultado do ensaio de dureza nas amostras de aço Maraging 18Ni300

Amostra Maraging300	Dureza HRC					Média	Desvio padrão	Intervalo confiança $\alpha=0,05$
	p1	p2	p3	p4	p5			
M29	53,0	53,0	53,5	53,5	54,0			
M18	54,0	54,0	54,0	53,5	54,0	53,7	0,36	0,20
M16	53,5	54,0	54,0	54,0	54,0			

Relatório de dureza O.S 13/09 (Anexo IV)

A dureza encontrada acima para os aço 300M-ESR e Maraging 18Ni300 está dentro da faixa especificada no projeto (50,0 a 54,0 HRC) dos envelopes motores de 1.000 mm de diâmetro. De acordo com os dados da tabela acima pode-se concluir que a dureza das amostras de aço 300M-ESR após tratamento térmico, para um intervalo de confiança de 95%, é de $(52,8 \pm 0,24 \text{ HRC})$, ou seja, varia entre 52,56 e 53,04 HRC e a do aço Maraging 18Ni300 é de $(53,7 \pm 0,20 \text{ HRC})$, ou seja, varia entre 53,5 e 53,9HRC.

5.2.2 Ensaio realizados nas amostras após jateamento abrasivo

5.2.2.1 Perfilometria óptica

O levantamento da topografia da superfície das amostras de aço 300M-ESR e Maraging 18Ni300 foi realizado por perfilometria óptica (Figura 51) no Laboratório Associado de Sensores e Materiais (LAS), pertencente ao Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais (INPE) com o objetivo de visualizar a topografia da superfície e ter um parâmetro do acréscimo da área potencial de contato.

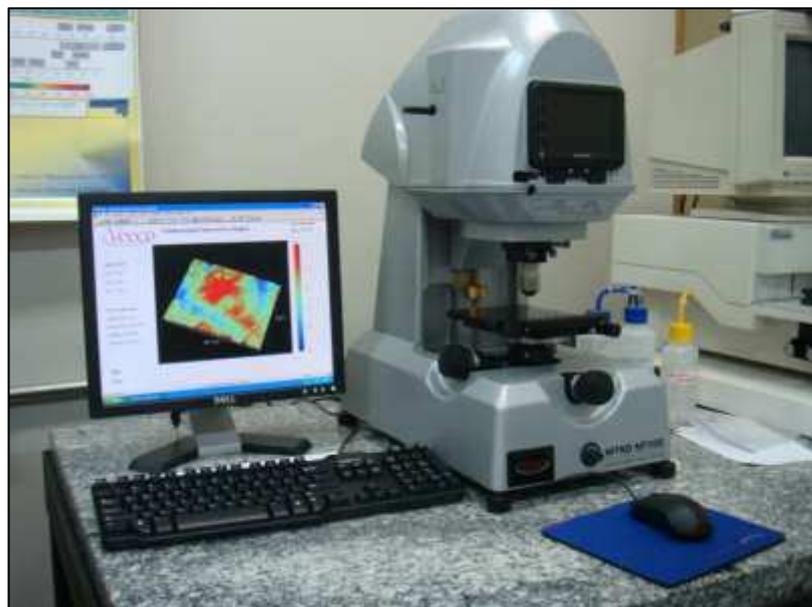


Figura 51 - Perfilômetro óptico do Laboratório Associado de Sensores e Materiais (INPE)

5.2.2.2 Microscopia eletrônica

As características da morfologia superficial das amostras de aço 300M-ESR e Maraging 18Ni300 submetidas a tratamento superficial de jateamento abrasivo a seco com granalha de aço de perfil angular GH-50, via máquina de jateamento por sucção, com pressão de 0,7 MPa, tendo como aspecto visual de limpeza Sa3 ao metal branco, foram avaliadas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), Figura 52 pertencente à Divisão de Materiais do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE).



Figura 52 - Microscópio eletrônico de varredura (MEV) da Divisão de Materiais do IAE

5.3 Preparação dos corpos de prova para ensaio de cisalhamento

Os corpos de prova utilizados para ensaio de cisalhamento são do tipo “*junta adesivada*” (Figura 53 e 54), preparados a partir das amostras de aço selecionadas em função de sua rugosidade superficial e de placas de carbono com resina fenólica. Essa junta adesivada é uma adaptação da norma ASTM D1002-05 (ASTM, 2005).

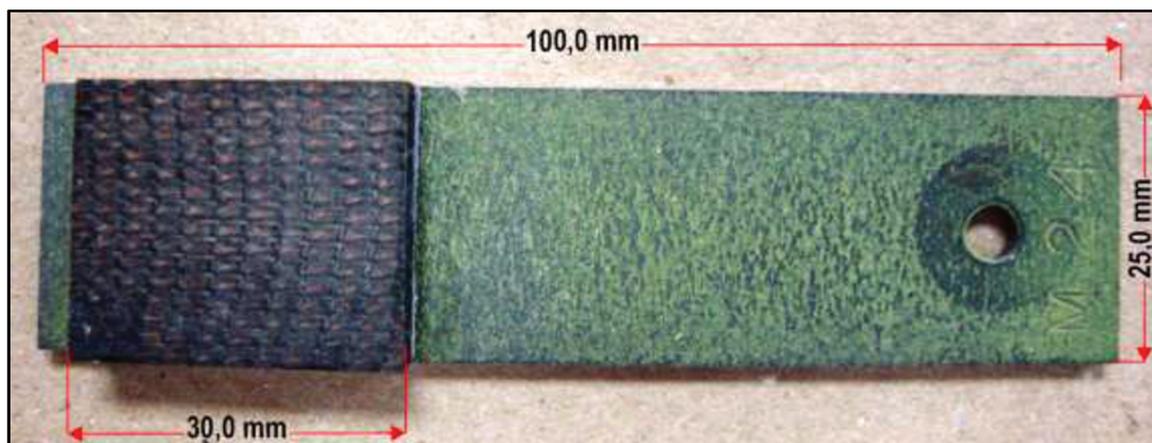


Figura 53 - Corpo de prova tipo “junta adesivada” utilizado no ensaio de cisalhamento (Fonte: Autor)

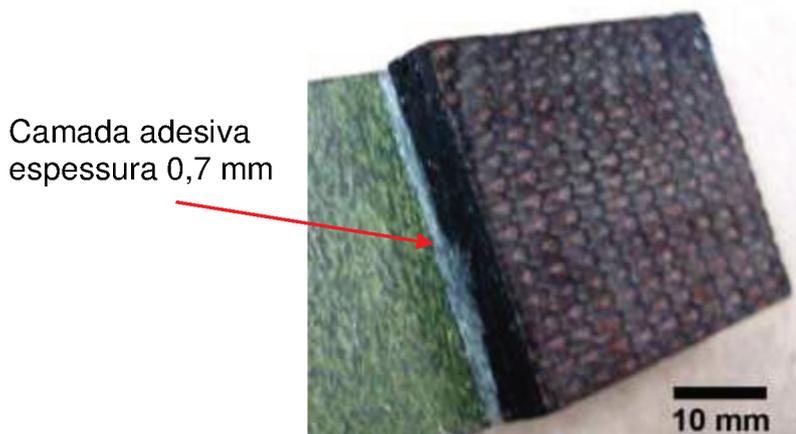


Figura 54 – Detalhe da camada de adesivo (espessura igual a 0,7 mm) no corpo de prova de cisalhamento (Fonte: Autor)

Com o objetivo de reproduzir nas amostras de aço o mesmo procedimento utilizado na preparação da superfície dos envelopes motores foguete, foi aplicado uma fina camada de *primer* com o objetivo de ativá-la, após o procedimento de jateamento abrasivo e de limpeza da superfície com tricloroetano para a remoção dos resíduos de granalha da superfície.

O *primer* (Figura 55) utilizado na superfície das amostras de aço foi preparado no Laboratório de Adesão da Divisão de Química do Instituto de Aeronáutica e Espaço

(IAE). Trata-se de um *primer* bicomponente, Revran PCZ-520, contendo um componente anticorrosivo (cromato de zinco).



Figura 55 - Aplicação de *primer* na superfície das amostras de aço após jateamento abrasivo e limpeza com tricloroetano (Fonte: Autor)

Após a preparação da superfície das amostras de aço, teve início o processo de colagem das juntas adesivadas. Para isso, foi utilizado um dispositivo de colagem (Figura 56 a 62) com o objetivo de garantir a qualidade das juntas adesivadas, principalmente quanto ao alinhamento das partes coladas e à espessura do adesivo na área de colagem que deve ser mantida constante, semelhante à espessura do filme de adesivo na interface colada metal/isolante térmico no envelope motor foguete. Para isso, foi utilizado dois pedaços de arame de aço inox com diâmetro de 0,7 mm, interposto entre a superfície da amostra de aço e a placa de carbono fenólica conforme Figura 58.

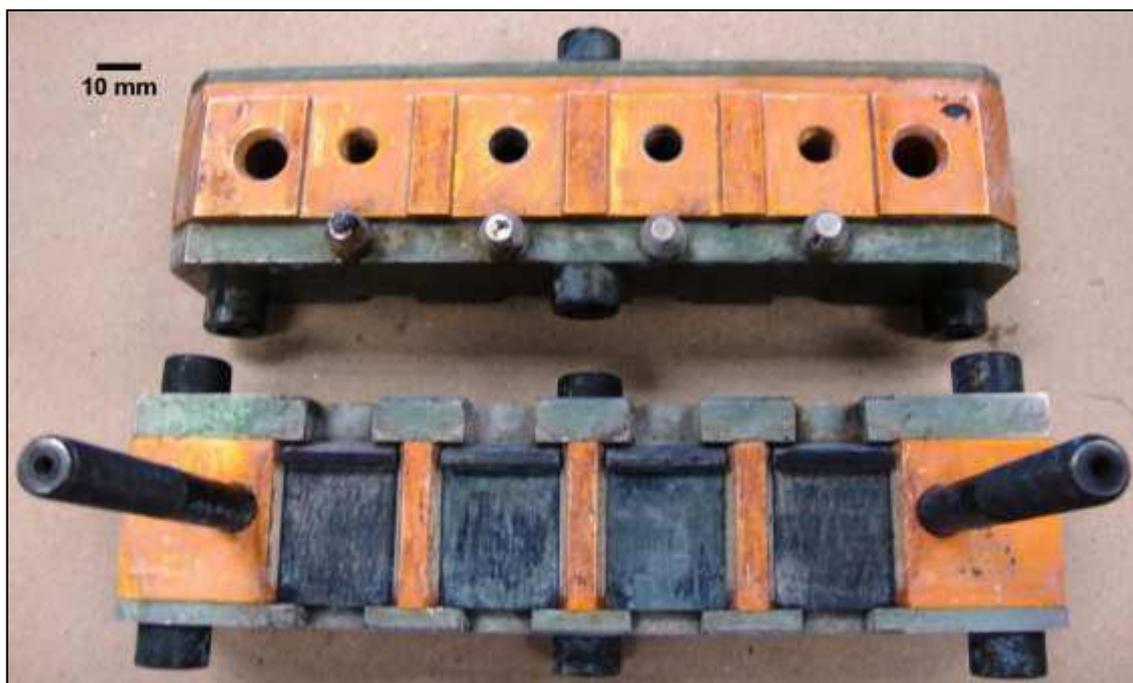


Figura 56 - Dispositivo de colagem (Fonte: Autor)

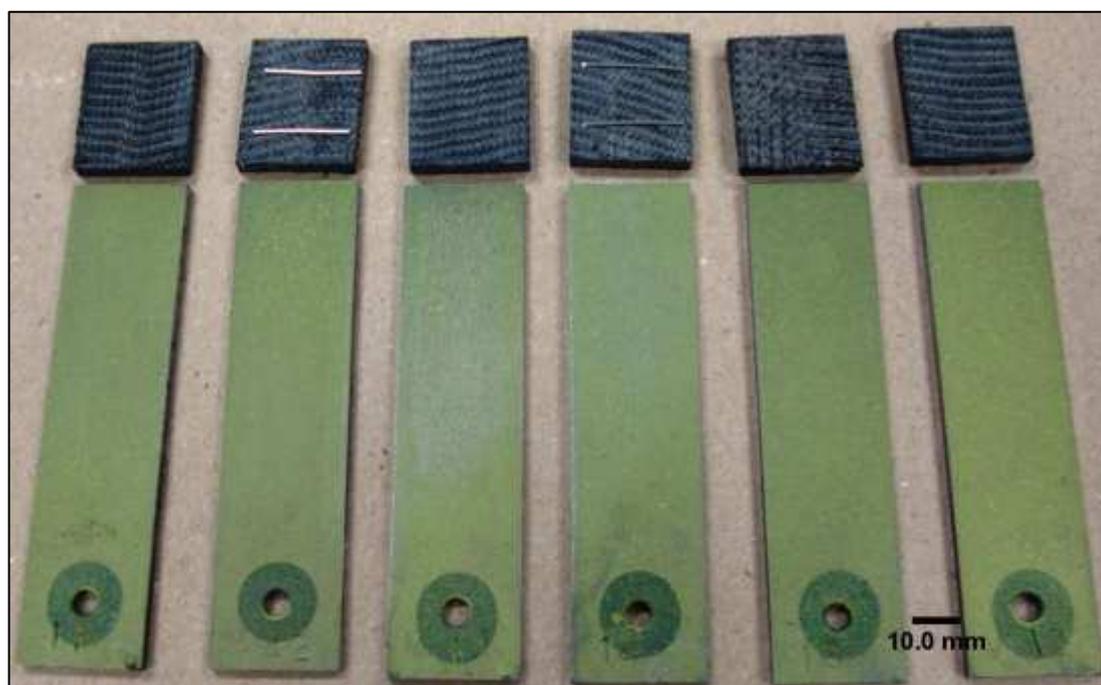


Figura 57 - Amostras de aço e placas de carbono fenólica preparadas para serem coladas (Fonte: Autor)

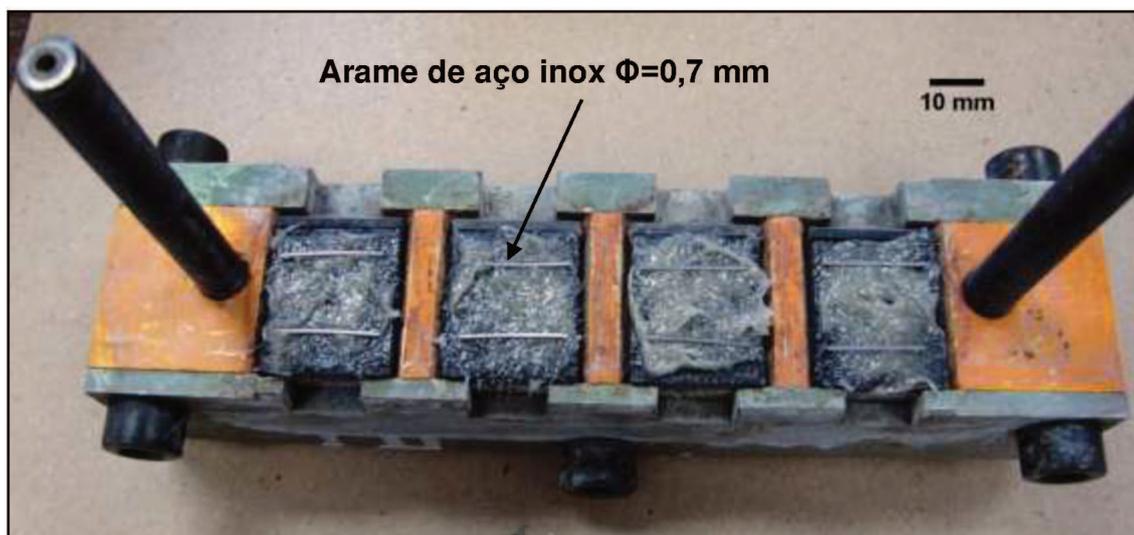


Figura 58 - Placas de carbono fenólica posicionadas no dispositivo de colagem. Observa-se o arame de aço inox para manter constante a espessura do filme de adesivo após a colagem

(Fonte: Autor)



Figura 59 - Amostras de aço posicionadas para colagem (Fonte: Autor)



Figura 60 - Detalhe do posicionamento das amostras de aço no dispositivo de colagem
(Fonte: Autor)



Figura 61 - Detalhe da camada de desmoldante utilizada no dispositivo de colagem (Fonte: Autor)

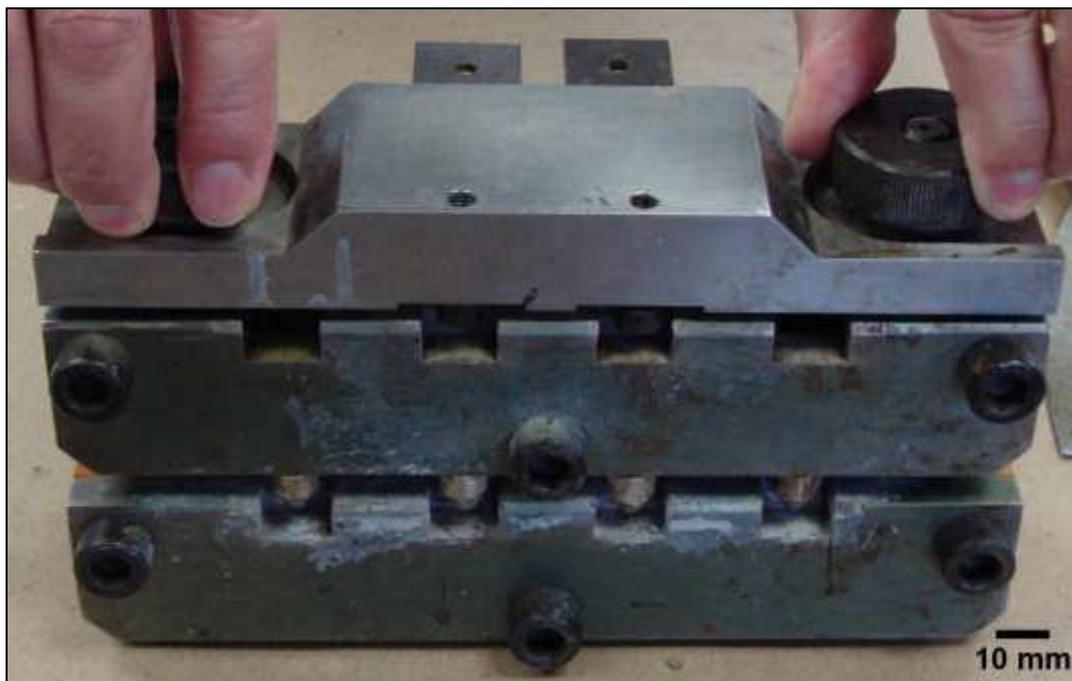


Figura 62 - Detalhe do fechamento do dispositivo, de forma a pressionar a camada de cola, produzindo a espessura prevista de 0,7 mm (Fonte: Autor)

Todo o procedimento de colagem foi realizado em temperatura ambiente (25°C). O dispositivo de colagem recebeu uma fina camada de desmoldante (Figura 61), de forma a facilitar a retirada posterior de adesivo que viesse a aderir na superfície do dispositivo por conta do excesso de cola durante o processo de colagem. O adesivo foi aplicado nas duas áreas de colagem com auxílio de espátula. A colagem no dispositivo foi efetuada de forma a molhar ambas as superfícies, primeiramente posicionando a placa de carbono fenólica na parte inferior e depois fazendo o encaixe da junta cuidadosamente com a amostra de aço na parte superior.

O adesivo utilizado foi preparado pelo Laboratório de Adesão da Divisão de Química do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE). Trata-se de um adesivo estrutural termofixo denominado APR 03, à base de resina epóxi (50%) em formato de pasta e agente de cura (HY-951) em forma líquida, com cura à temperatura ambiente durante quarenta oito horas. Em seguida, o dispositivo de colagem foi fechado de forma a pressionar a camada de cola, de modo a produzir a espessura prevista de 0,7 mm.

5.3.1 Ensaio mecânico de cisalhamento

A resistência mecânica na interface colada metal/isolante térmico foi verificada por ensaio de cisalhamento realizado em uma máquina universal modelo ZWICK 1474 (Figura 63) no Laboratório de Propriedades Mecânicas da Divisão de Química do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE). Para a realização desse ensaio foram utilizadas vinte e quatro amostras de aço (doze em aço 300M-ESR e doze em aço Maraging 18Ni300) de um total de quarenta e oito amostras que tiveram suas superfícies preparadas através dos vários experimentos realizados nos equipamentos 1 e 2. Essas amostras foram utilizadas como aderentes na preparação das juntas adesivadas empregadas como corpos de prova no ensaio de cisalhamento.

O critério adotado para a escolha das amostras de aço foi a rugosidade superficial obtida após o tratamento superficial de jateamento abrasivo com granalha de aço de perfil angular GH-50, também chamado de "*perfil de ancoragem*". Para cada tipo de aço (300M-ESR e Maraging 18Ni300) e equipamento de jateamento (equipamento 1 e 2) foram escolhidas as amostras que apresentaram o maior e o menor nível de rugosidade superficial. Com esse procedimento, procurou-se abranger toda a faixa de rugosidade superficial ou padrão de ancoragem possível de se obter com o processo atual de preparação de superfície para colagem de isolantes térmicos em envelopes motores de 1.000 mm de diâmetro e, conseqüentemente, obter o intervalo de resistência mecânica adesiva pertinente ao processo atual de preparação de superfície.



Figura 63 - Máquina de ensaio ZWICK 1474 (DCTA/IAE)

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo são apresentados os resultados obtidos em todos os ensaios experimentais, bem como as análises visuais das imagens, dos gráficos e as análises estatísticas. Os resultados estão expressos em seus valores médios, devido à grande quantidade de dados obtidos. Para facilitar a compreensão e a análise dos dados desse trabalho, foi gerado o fluxograma abaixo (Figuras 64 a 66) com a finalidade de identificar as várias medidas de rugosidade obtidas em cada experimento.

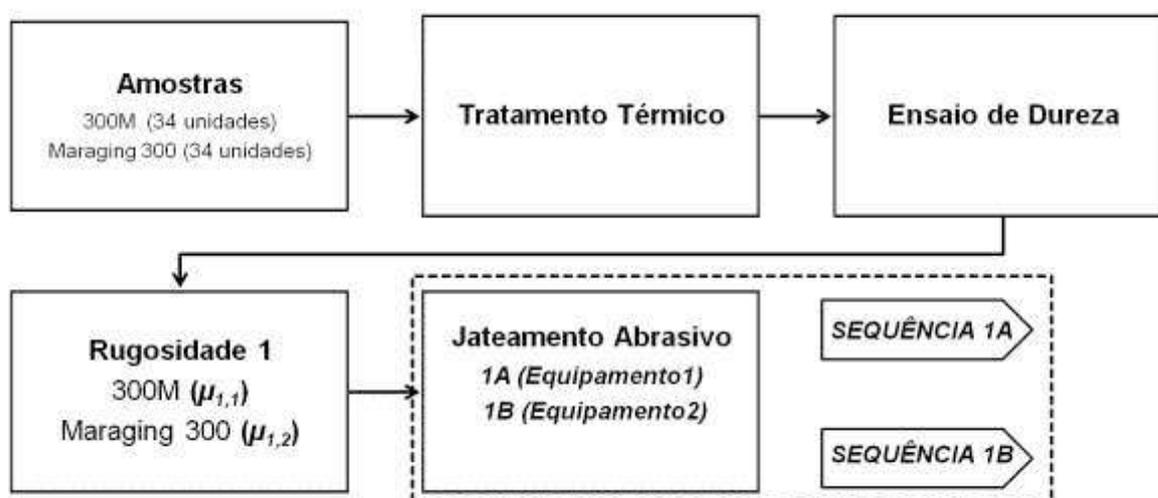


Figura 64 – Fluxograma macro das etapas do experimento - Parte 1

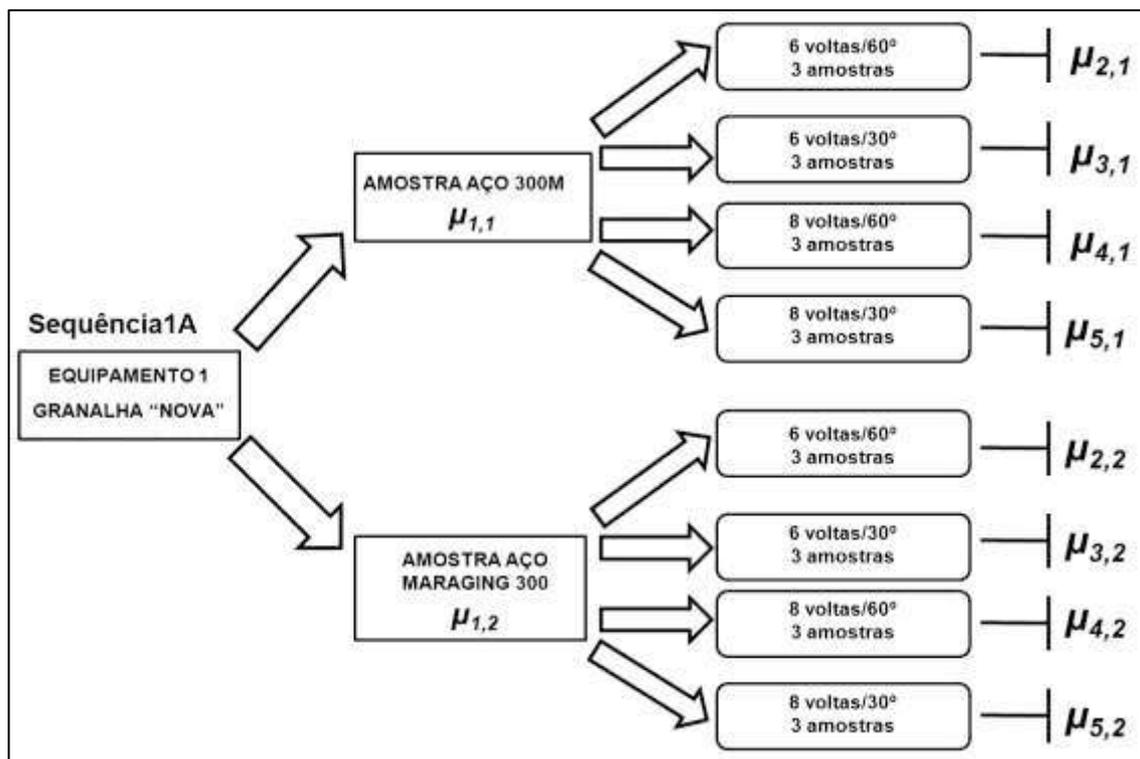


Figura 65 - Fluxograma dos experimentos no equipamento 1 - Sequência 1A

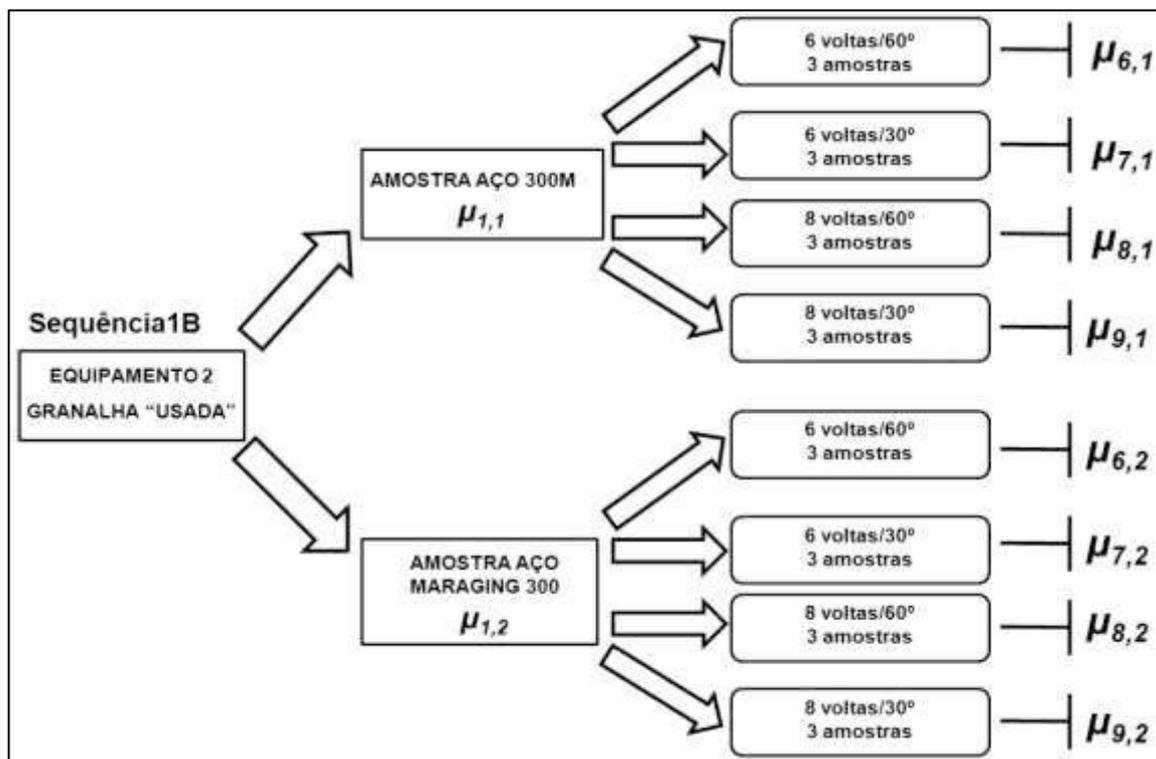


Figura 66 - Fluxograma dos experimentos no equipamento 2 - Sequência 1B

6.1 Caracterização da Superfície

As superfícies das amostras ensaiadas foram avaliadas quanto à rugosidade superficial nas condições após tratamento térmico e após tratamento superficial mecânico de jateamento abrasivo a seco com granalha de aço angular GH-50, sendo que a aplicação do tratamento superficial de jateamento ocorreu somente após todas as amostras terem sido tratadas termicamente. A caracterização da superfície das amostras foi realizada em duas e três dimensões.

A caracterização da rugosidade superficial em duas dimensões foi realizada em todas as amostras a fim de se obter os parâmetros de rugosidade média Ra (μm). Já a caracterização em três dimensões foi realizada em apenas uma amostra de cada aço, nas condições após tratamento térmico e após tratamento superficial de jateamento abrasivo, com o objetivo de visualizar a topografia da superfície e ter um parâmetro do acréscimo da área potencial de contato.

6.1.1 Determinação da rugosidade superficial após tratamento térmico

Após a realização do tratamento térmico nas amostras ocorreu a medição da rugosidade superficial conforme procedimento descrito no Capítulo 4, item 4.3.2, com o objetivo de verificar a textura inicial de cada material.

6.1.1.1 Para o aço 300M-ESR

Os valores referentes à rugosidade superficial nas amostras de aço 300M-ESR estão na Tabela 11.

Tabela 11 - Valores de rugosidade Ra (μm) para amostras de aço 300M-ESR após tratamento térmico

Amostra	Rugosidade Ra (μm)					
	<u>Longitudinal</u>			<u>Transversal</u>		
	pos 1	pos 2	pos 3	pos 1	pos 2	pos 3
1	3,43	4,35	4,68	4,46	4,62	4,50
2	4,65	4,31	3,91	4,40	3,45	5,50
3	3,68	4,54	2,93	4,22	4,56	3,04
4	4,04	4,35	4,09	3,97	3,85	4,25
5	4,30	4,67	2,66	5,52	4,03	3,50
6	3,28	3,25	2,87	3,50	2,55	3,34
7	5,21	4,69	4,23	5,08	5,03	4,99
8	4,48	4,00	4,18	4,96	3,40	4,66
9	5,08	5,77	5,41	4,56	4,76	5,83
10	5,28	4,59	4,01	4,18	4,94	4,78
11	4,41	3,43	4,21	4,50	4,08	3,49
12	4,00	4,88	4,75	5,39	4,41	5,32
13	4,74	5,23	3,85	5,40	5,06	5,42
14	4,66	5,17	5,95	5,41	4,38	4,93
15	4,23	4,37	4,18	4,13	4,96	4,98
16	5,04	3,09	3,78	3,28	3,48	4,23
17	5,15	4,52	3,78	3,72	3,80	3,80
18	3,82	3,02	4,45	5,06	2,74	3,31
19	5,69	4,92	4,42	5,15	4,84	4,84
20	4,43	2,94	2,84	3,48	3,30	3,79
21	4,66	4,02	4,49	5,96	5,30	5,00
22	5,09	5,16	5,47	5,97	5,23	5,74
23	4,78	3,63	4,09	3,41	3,95	4,54
24	4,12	3,59	3,89	4,52	2,98	3,66
25	3,65	3,93	4,66	3,62	3,94	4,31
26	4,44	4,29	4,11	3,97	3,94	3,97
27	5,40	3,91	5,30	4,39	4,56	5,86
28	4,60	3,38	4,47	5,04	4,37	5,20
29	4,35	4,56	5,21	4,63	4,62	4,66
30	5,31	3,70	4,73	4,13	4,27	3,67
31	3,51	3,84	4,67	3,13	3,18	4,11
32	4,58	3,45	3,67	3,75	3,19	3,83
33	3,52	3,39	4,40	4,40	3,06	5,54
34	4,25	3,52	3,89	4,70	4,75	3,79

Dos dados da Tabela 11 pode-se concluir que a rugosidade superficial média das amostras de aço 300M-ESR ($\mu_{1,1}$) após tratamento térmico, dentro de um intervalo de confiança de 95%, é de $(4,32 \pm 0,10 \mu\text{m})$, ou seja, varia entre $4,22 \mu\text{m}$ e $4,42 \mu\text{m}$.

6.1.1.2 Para o aço Maraging 18Ni300

Os valores referentes à rugosidade superficial das amostras de aço Maraging 18Ni300 estão na Tabela 12.

Tabela 12 - Valores de rugosidade Ra (μm) para amostras de aço Maraging 18Ni300 após tratamento térmico

Amostra	Rugosidade Ra (μm)					
	Longitudinal			Transversal		
	pos 1	pos 2	pos 3	pos 1	pos 2	pos 3
M-01	2,47	2,85	2,78	3,56	3,15	3,72
M-02	3,13	2,79	2,73	3,09	2,21	2,55
M-03	1,82	1,82	2,34	2,61	2,25	2,78
M-04	2,21	2,66	2,71	2,34	2,83	2,75
M-05	3,12	3,29	2,83	3,25	4,18	3,77
M-06	2,59	2,54	2,16	1,95	2,55	1,82
M-07	1,85	2,35	2,13	1,68	2,14	2,27
M-08	2,04	1,97	2,44	1,59	2,11	1,84
M-09	3,23	3,25	3,15	2,68	2,43	2,71
M-10	1,87	1,47	1,94	2,00	1,98	1,95
M-11	3,27	2,10	3,71	3,42	3,53	3,72
M-12	2,92	2,22	2,95	1,92	1,69	2,42
M-13	2,16	2,60	3,28	2,81	3,09	3,19
M-14	3,01	2,55	3,02	1,92	1,69	2,42
M-15	2,10	2,27	2,16	1,87	1,81	2,09
M-16	3,42	1,95	2,12	3,58	2,34	2,23
M-17	3,69	2,10	2,83	2,54	2,13	2,23
M-18	2,16	2,50	2,08	1,82	1,98	1,66
M-19	3,07	2,93	2,79	2,33	2,50	2,43
M-20	2,65	1,70	2,27	2,98	2,27	2,98
M-21	2,22	1,75	1,70	2,34	2,41	2,01
M-22	2,19	2,29	3,07	2,68	3,04	3,50
M-23	1,94	2,01	1,96	1,83	1,34	1,64
M-24	3,07	2,96	3,31	2,97	3,18	2,43
M-25	3,05	2,03	2,67	3,24	2,28	2,56
M-26	3,30	2,37	3,21	1,79	2,62	2,12
M-27	2,11	2,19	2,39	3,08	3,28	3,07
M-28	3,79	3,52	3,39	2,52	2,60	3,10
M-28	3,79	3,52	3,39	2,52	2,60	3,10
M-29	2,01	1,87	1,73	1,37	1,44	1,60
M-30	3,33	2,89	3,83	3,39	4,10	5,42
M-31	2,37	3,58	3,57	2,27	2,77	3,34
M-32	2,05	1,66	2,15	2,12	2,17	1,79
M-33	3,16	2,96	3,15	3,04	3,25	3,09
M-34	2,48	2,75	2,89	3,04	3,25	3,09

Dos dados da Tabela 12 pode-se concluir que a rugosidade superficial média das amostras de aço Maraging 18Ni300 ($\mu_{1,2}$) após tratamento térmico, dentro de um intervalo de confiança de 95%, é de $(2,60 \pm 0,09 \mu\text{m})$, ou seja, varia entre 2,51 μm e 2,68 μm .

O gráfico abaixo (Figura 67) compara as rugosidades médias das amostras de aço 300M-ESR e Maraging 18Ni300 de acordo com os dados obtidos nas tabelas acima.

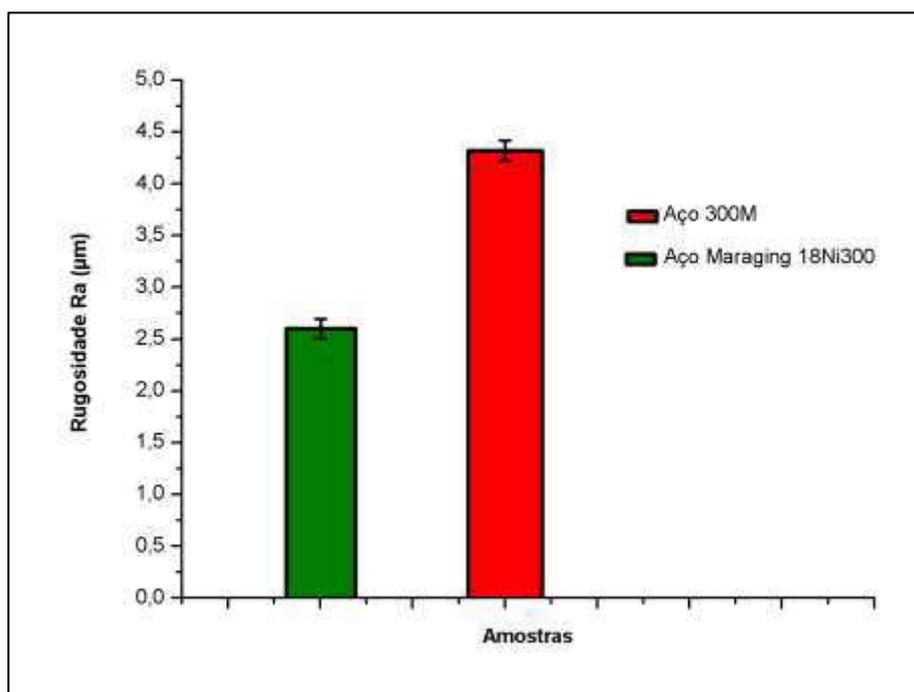


Figura 67 - Gráfico comparativo da rugosidade média das amostras de aço após tratamento térmico (Fonte: Autor)

Para verificar se as diferenças de rugosidade média entre as amostras de aço 300M-ESR e Maraging 18Ni300 (Tabela 13) são significativas segundo as condições experimentais utilizadas, foi aplicado o teste estatístico conhecido como análise de variância (ANOVA). No teste de análise de variância foi adotado um nível de significância de 5% ($\alpha=0,05$) como critério de confiança, utilizado nos resultados da pesquisa.

Tabela 13 - Condição superficial inicial das amostras de aço após a realização do tratamento térmico

Amostra	Rugosidade média Ra (μm) Após tratamento térmico
300M-ESR	$\mu_{1,1} = 4,32$
Maraging 300	$\mu_{1,2} = 2,60$

O resultado da análise de variância está detalhada na Tabela 14.

Tabela 14 - Resultados da análise de variância da rugosidade superficial média Ra (μm) entre as amostras de aço 300M-ESR e Maraging 18Ni300

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrados Médios	F_{calc}	Valor P
Material	1	51,078	51,078	188,83	0,0001
Residual	67	18,123	0,27		
Total	68	69,201			

A análise da Tabela 14 mostra que existe diferença significativa entre as rugosidades superficiais médias (Ra) das amostras de aço 300M-ESR e Maraging 18Ni300, uma vez que o valor P é inferior ao nível de significância de 5% ($\text{Valor P} = 0,0001 \leq \alpha = 0,05$). Entretanto, para saber o valor dessa diferença foi aplicado o teste de Tukey em nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$) para determinar o intervalo de confiança dessa diferença entre médias. O resultado do teste de Tukey está detalhado na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultado do teste de Tukey para a diferença de rugosidade média entre os aço 300M-ESR e Maraging 18Ni300

Comparação	Diferença Nominal	Intervalo de Confiança	Resultado
$\mu_{1,1} - \mu_{1,2}$	1,7209	1,4710 a 1,9709	$\mu_{1,1} \neq \mu_{1,2}$

Da Tabela 15 pode-se concluir que a diferença entre as rugosidades médias ($\mu_{1,1} - \mu_{1,2}$) varia de 1,47 μm a 1,97 μm . Isto demonstra que de fato existe uma diferença na textura superficial das chapas de aços em estudo, que poderá interferir ou não na resistência mecânica final da interface colada metal/isolante térmico. Essa pergunta é respondida ao final deste trabalho, após a análise do conjunto de dados obtidos do tratamento superficial de jateamento abrasivo com granalha de aço de perfil angular GH-50, aplicado sobre a superfície das amostras em estudo e do ensaio de

cisalhamento a ser realizado após a aderência do isolante térmico (placa de carbono fenólica) na superfície dessas amostras.

6.1.2 Determinação da rugosidade superficial após jateamento abrasivo

6.1.2.1 Resultados para o equipamento 1 de jateamento abrasivo

6.1.2.1.1 Aço 300M-ESR

Os valores de rugosidade superficial obtido com as amostras de aço 300M-ESR, após tratamento superficial de jateamento abrasivo a seco com granalha de aço de perfil angular GH-50, na condição “nova” são apresentados na Tabela 16. A Tabela 17 apresenta uma média desses valores, para um intervalo de confiança de 95%, para cada experimento realizado no equipamento 1.

Tabela 16- Valores de rugosidade Ra (μm) para amostras de aço 300M-ESR jateadas no equipamento 1

Experimento	Amostra	Rugosidade Ra (μm)						Média	Desvio padrão
		Longitudinal			Transversal				
		1	2	3	1	2	3		
$\mu_{2,1}$	1	6,94	6,54	7,23	6,49	6,48	6,37	6,68	0,34
	2	5,90	6,07	6,53	7,71	6,66	6,90	6,63	0,65
	24	6,49	6,92	6,58	5,43	6,44	6,20	6,34	0,50
$\mu_{4,1}$	12	7,24	6,54	7,14	6,20	7,00	6,34	6,74	0,44
	25	6,81	6,38	6,96	6,70	6,47	7,03	6,73	0,26
	8	6,00	6,40	6,49	6,78	7,21	6,19	6,51	0,43
$\mu_{5,1}$	5	5,68	5,15	6,64	5,73	6,14	5,97	5,89	0,50
	15	5,97	5,81	6,14	6,58	6,12	5,30	5,99	0,42
	6	5,82	6,07	6,00	6,19	6,34	6,45	6,15	0,23
$\mu_{3,1}$	9	6,55	6,53	6,21	6,49	5,25	6,12	6,19	0,49
	18	6,50	6,03	5,88	6,44	5,37	6,05	6,05	0,41
	34	6,39	6,71	6,67	6,87	7,22	6,19	6,68	0,36

Tabela 17 – Média dos valores de rugosidade encontrado nas amostras de aço 300M-ESR jateadas no equipamento 1

Experimento	Rugosidade Ra (μm)			
	Granalha	Vazão	Ângulo	Amostra 300M
$\mu_{2,1}$	Nova	6 Voltas	60°	6,55±0,23
$\mu_{4,1}$	Nova	8 Voltas	60°	6,66±0,18
$\mu_{5,1}$	Nova	8 Voltas	30°	6,01±0,18
$\mu_{3,1}$	Nova	6 Voltas	30°	6,30±0,22

6.1.2.1.2 Aço Maraging 18Ni300

Os valores de rugosidade superficial obtido com as amostras de aço Maraging 18Ni300 após tratamento superficial de jateamento abrasivo a seco com granalha de aço de perfil angular GH-50, na condição “nova” são apresentados na Tabela 18. A Tabela 19 apresenta uma média desses valores, para um intervalo de confiança de 95%, para cada experimento realizado no equipamento 1.

Tabela 18 - Valores de rugosidade Ra (μm) para amostras de aço Maraging 18Ni300 jateadas no equipamento 1

Experimento	Amostra	Rugosidade Ra (μm)						Média	Desvio padrão
		Longitudinal			Transversal				
		1	2	3	1	2	3		
$\mu_{2,2}$	M04	5,27	4,39	5,14	5,92	5,62	5,57	5,32	0,53
	M06	6,23	6,42	6,60	4,67	4,89	5,01	5,64	0,87
	M26	5,97	5,85	6,23	4,62	4,58	5,07	5,39	0,72
$\mu_{4,2}$	M07	5,32	6,00	5,94	5,01	4,74	5,37	5,40	0,50
	M20	3,89	4,00	4,02	5,31	4,46	4,77	4,51	0,55
	M21	4,46	5,05	4,89	4,09	4,37	4,37	4,54	0,36
$\mu_{5,2}$	M13	4,00	4,75	4,41	5,25	5,58	4,63	4,77	0,57
	M27	5,45	6,06	5,03	4,74	6,34	6,06	5,61	0,64
	M29	4,13	3,62	4,00	4,18	3,54	2,89	3,73	0,49
$\mu_{3,2}$	M10	2,94	2,05	2,94	3,64	3,62	4,61	3,30	0,87
	M16	4,35	5,00	4,29	4,98	3,96	4,50	4,51	0,41
	M24	6,48	6,52	6,05	6,43	6,18	5,74	6,23	0,30

Tabela 19 - Média dos valores de rugosidade encontrado nas amostras de aço Maraging 18Ni300 jateadas no equipamento 1

Experimento	Rugosidade Ra (μm)			
	Granalha	Vazão	Ângulo	Amostra
				Maraging 300
$\mu_{2,2}$	Nova	6 Voltas	60°	5,45±0,32
$\mu_{4,2}$	Nova	8 Voltas	60°	4,83±0,28
$\mu_{5,2}$	Nova	8 Voltas	30°	4,74±0,44
$\mu_{3,2}$	Nova	6 Voltas	30°	4,68±0,63

A Tabela 20 compara os valores de rugosidade superficial média, para um intervalo de confiança de 95%, encontrados para os aços 300M-ESR e Maraging 18Ni300 nas diversas condições em que os experimentos foram realizados no equipamento 1. Esses valores são também comparados na Figura 68.

Tabela 20 - Valores de rugosidade média (Ra) encontrados para os aços 300M-ESR e Maraging 300 no equipamento 1

Rugosidade Ra (μm)				
Experimento			Amostra	
Granalha	Vazão	Ângulo	300M	Maraging 300
Nova	6 Voltas	60°	6,55±0,23	5,45±0,32
Nova	8 Voltas	60°	6,66±0,18	4,83±0,28
Nova	8 Voltas	30°	6,01±0,18	4,74±0,44
Nova	6 Voltas	30°	6,30±0,22	4,68±0,63

A aplicação da análise de variância (ANOVA), ao nível de confiança de 5%, nos dados das Tabelas 16 e 18 (memória de cálculo não publicada) indicam que as diferenças entre as médias de rugosidades encontradas nos experimentos com os dois tipos de aço (Tabela 20), realizados no equipamento 1, não são estatisticamente significativas, ou seja:

$$(\mu_{2,1} = \mu_{3,1} = \mu_{4,1} = \mu_{5,1}) \text{ e } (\mu_{2,2} = \mu_{3,2} = \mu_{4,2} = \mu_{5,2})$$

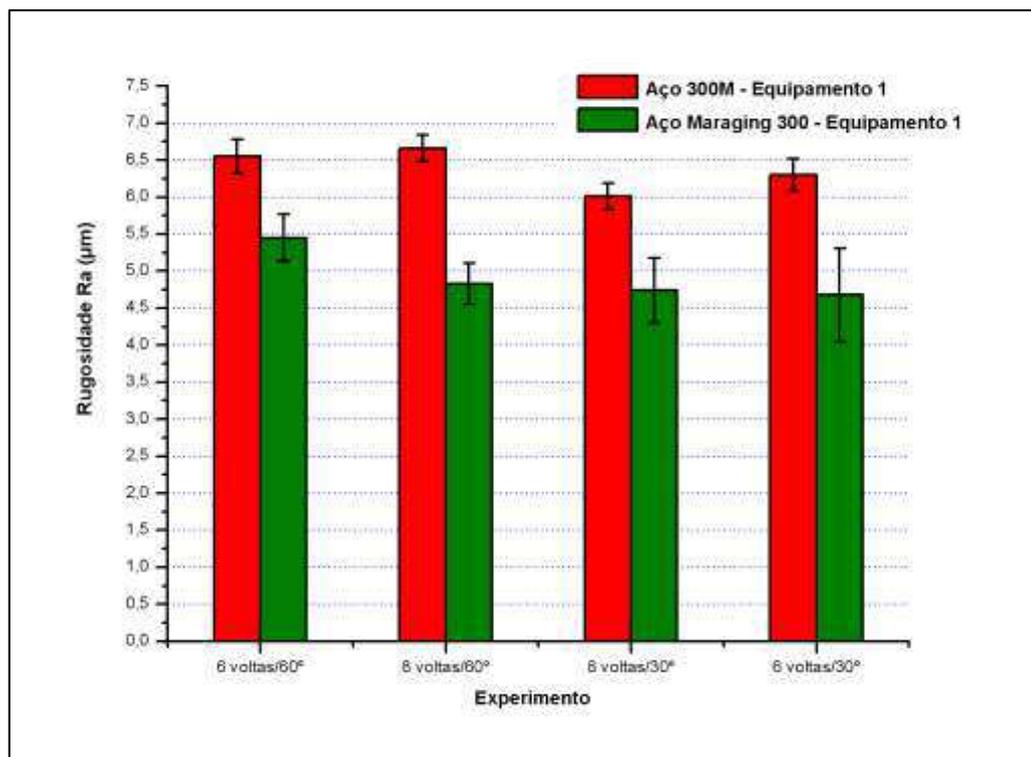


Figura 68 – Gráfico comparativo entre as rugosidades médias das amostras de aços 300M-ESR e Maraging 18Ni300 jateadas no equipamento 1 (Fonte: Autor)

6.1.2.2 Resultado para o equipamento 2 de jateamento abrasivo

6.1.2.2.1 Aço 300M-ESR

Os valores de rugosidade superficial obtido com as amostras de aço 300M-ESR, após tratamento superficial de jateamento abrasivo a seco com granalha de aço de perfil angular GH-50, na condição “*usada*” são apresentadas na Tabela 21. A Tabela 22 apresenta uma média desses valores, para um intervalo de confiança de 95%, para cada experimento realizado no equipamento 1.

Tabela 21 - Valores de rugosidade Ra (μm) para amostras de aço 300M-ESR jateadas no equipamento 2

Experimento	Amostra	Rugosidade Ra (μm)						Média	Desvio padrão
		Longitudinal			Transversal				
		1	2	3	1	2	3		
$\mu_{6,1}$	10	5,91	5,94	5,58	6,50	6,19	5,42	5,92	0,39
	11	5,99	6,22	5,98	6,30	6,29	5,53	6,05	0,29
	13	5,96	5,75	5,80	6,35	6,11	6,17	6,02	0,23
$\mu_{8,1}$	19	6,68	5,86	5,68	6,19	6,11	6,34	6,14	0,35
	20	6,28	6,03	6,38	6,14	5,62	6,57	6,17	0,33
	21	5,66	5,24	5,86	6,41	6,18	5,95	5,88	0,41
$\mu_{9,1}$	14	6,07	5,44	5,51	4,72	5,53	5,82	5,52	0,46
	16	5,69	5,36	5,64	5,22	4,82	4,93	5,35	0,35
	17	6,15	6,46	6,44	6,62	5,91	5,22	6,32	0,28
$\mu_{7,1}$	22	6,36	5,23	5,94	5,79	6,21	5,72	5,88	0,40
	23	5,87	5,97	5,58	5,26	5,50	5,28	5,58	0,29
	26	6,58	6,16	6,55	5,58	5,27	5,66	5,97	0,54

Tabela 22 – Média dos valores de rugosidade encontrado nas amostras de aço 300M-ESR jateadas no equipamento 2

Experimento	Rugosidade Ra (μm)			
	Granalha	Vazão	Ângulo	Amostra 300M
$\mu_{6,1}$	Usada	6 Voltas	60°	6,00±0,14
$\mu_{8,1}$	Usada	8 Voltas	60°	6,07±0,18
$\mu_{9,1}$	Usada	8 Voltas	30°	5,71±0,27
$\mu_{7,1}$	Usada	6 Voltas	30°	5,81±0,21

6.1.2.2.2 Aço Maraging 18Ni300

Os valores de rugosidade superficial obtido com as amostras de aço Maraging 18Ni300, após tratamento superficial de jateamento abrasivo a seco com granalha de aço de perfil angular GH-50, na condição “*usada*” são apresentadas na Tabela 23. A Tabela 24 apresenta uma média desses valores, para um intervalo de confiança de 95%, para cada experimento realizado no equipamento 2.

Tabela 23 - Valores de rugosidade Ra (μm) para amostras de aço Maraging 18Ni300 jateadas no equipamento 2

Experimento	Amostra	Rugosidade Ra (μm)						Média	Desvio padrão
		Longitudinal			Transversal				
		1	2	3	1	2	3		
$\mu_{6,2}$	M08	5,47	5,25	5,39	4,53	4,86	4,76	5,04	0,38
	M09	6,56	6,10	5,72	4,78	5,07	5,08	5,55	0,69
	M11	4,45	4,56	4,40	5,15	6,28	4,66	4,92	0,72
$\mu_{8,2}$	M17	5,77	6,17	6,67	5,38	5,16	4,89	5,67	0,67
	M19	4,54	5,88	5,24	4,81	4,54	4,79	4,97	0,52
	M22	4,95	4,79	4,38	5,13	4,98	5,93	5,03	0,51
$\mu_{9,2}$	M12	5,11	4,71	4,48	3,81	4,23	3,81	4,36	0,51
	M14	3,98	3,73	3,21	4,36	3,96	3,87	3,85	0,38
	M15	3,62	4,18	4,26	4,56	3,82	3,48	4,06	0,42
$\mu_{7,2}$	M23	3,90	4,40	4,40	3,61	3,99	4,49	4,13	0,35
	M25	3,49	3,19	3,68	4,25	3,93	3,99	3,76	0,38
	M30	4,36	4,73	4,77	4,52	4,55	4,46	4,57	0,16

Tabela 24 - Média dos valores de rugosidade encontrado nas amostras de aço Maraging 18Ni300 jateadas no equipamento 2

Experimento	Rugosidade Ra (μm)			
	Granalha	Vazão	Ângulo	Amostra Maraging 300
$\mu_{6,2}$	Usada	6 Voltas	60°	5,17±0,31
$\mu_{8,2}$	Usada	8 Voltas	60°	5,22±0,30
$\mu_{9,2}$	Usada	8 Voltas	30°	4,09±0,23
$\mu_{7,2}$	Usada	6 Voltas	30°	4,15±0,22

A Tabela 25 compara os valores de rugosidade superficial média, para um intervalo de confiança de 95%, encontrados para os aços 300M-ESR e Maraging 18Ni300 nas diversas condições em que os experimentos foram realizados no equipamento 2. Esses valores são também comparados na Figura 69.

Tabela 25 - Resumo dos valores de rugosidade média encontrado para os aços 300M-ESR e Maraging 18Ni300 no equipamento 2

Rugosidade Ra (μm)				
Experimento			Amostra	
Granalha	Vazão	Ângulo	300M	Maraging 300
Usada	6 Voltas	60°	6,00±0,14	5,17±0,31
Usada	8 Voltas	60°	6,07±0,18	5,22±0,30
Usada	8 Voltas	30°	5,71±0,27	4,09±0,23
Usada	6 Voltas	30°	5,81±0,21	4,15±0,22

A aplicação da análise de variância (ANOVA), ao nível de confiança de 5%, nos dados das Tabelas 21 e 23 (memória de cálculo não publicada) indicam que as diferenças entre as médias de rugosidades encontradas nos experimentos com os dois tipos de aço (Tabela 25), realizados no equipamento 2, não são estatisticamente significativas, ou seja:

$$(\mu_{6,1} = \mu_{7,1} = \mu_{8,1} = \mu_{9,1}) \text{ e } (\mu_{6,2} = \mu_{7,2} = \mu_{8,2} = \mu_{9,2})$$

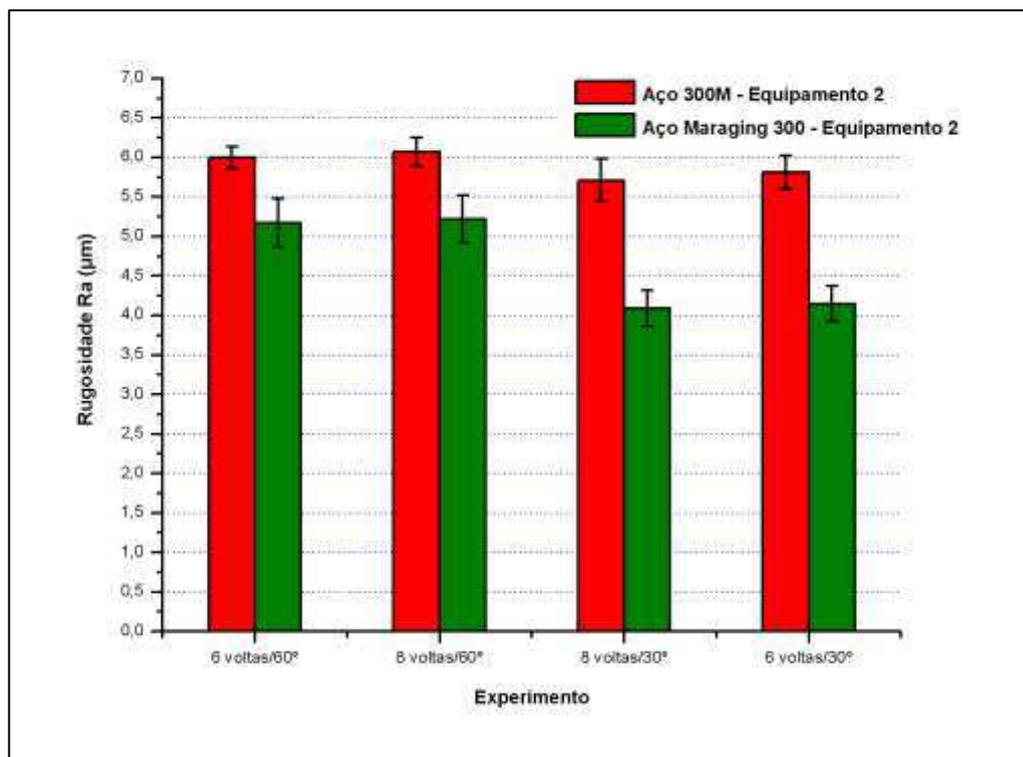


Figura 69 - Gráfico comparativo entre as rugosidades médias das amostras de aços 300M-ESR e Maraging 18Ni300 jateadas no equipamento 2 (Fonte: Autor)

6.1.3 Resultado da topografia da superfície

Foram utilizadas amostras de aço na condição após tratamento térmico e após tratamento superficial de jateamento abrasivo a seco com granalha de aço de perfil angular GH-50. As amostras foram jateadas no equipamento 1.

6.1.3.1 Para o aço 300M-ESR

Foi utilizada a amostra 25 que apresentou uma rugosidade média de 4,02 μm após tratamento térmico e de 6,73 μm após o jateamento abrasivo da superfície, conforme medição de rugosidade realizada com o rugosímetro portátil Taylor-Hobson, modelo Surtronic 3P. A topografia da superfície da amostra está detalhada nas Figuras 70 e 71. A área superficial real (A), após o tratamento superficial de jateamento abrasivo na amostra (Figura 71), foi medida pelo perfilômetro óptico em 0,095 mm^2 , sobre uma área efetiva (A_0) de 0,069 mm^2 (0,301 mm x 0,229 mm), o que dá um fator de rugosidade ($r = \frac{A}{A_0}$) igual a 1,37 para a superfície jateada da amostra de aço 300M-ESR.

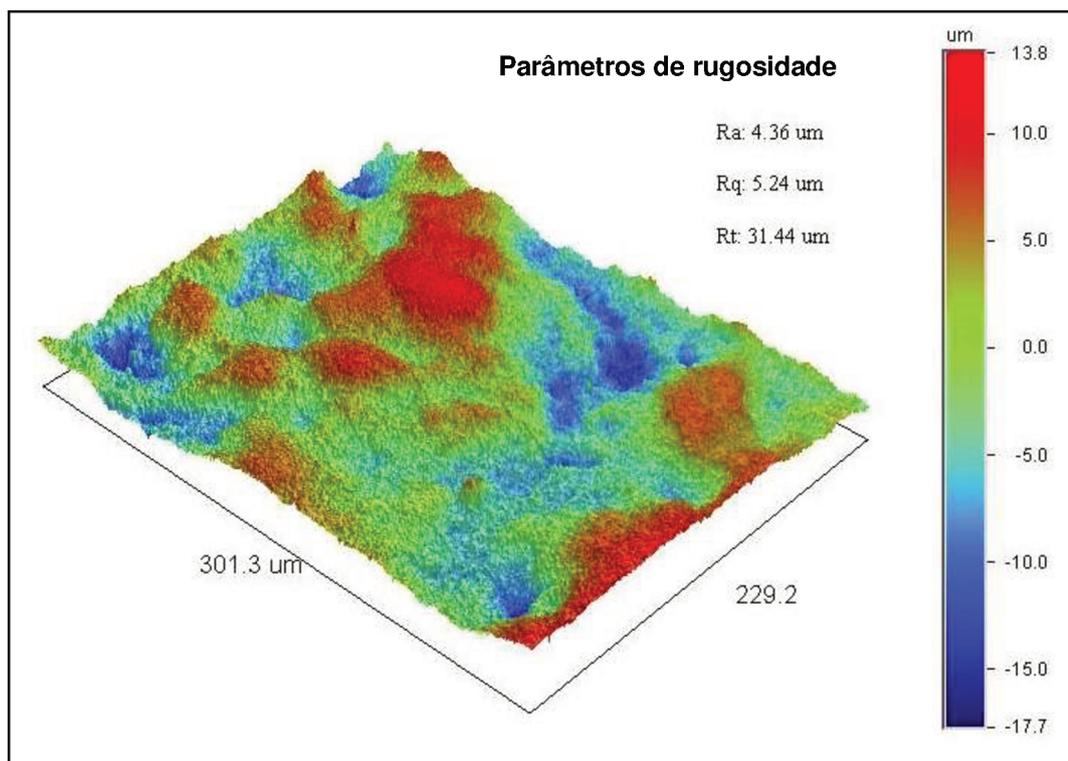


Figura 70 - Topografia da superfície da amostra de aço 300M-ESR (amostra 25), após tratamento térmico, realizada por perfilometria óptica (Fonte: Autor)

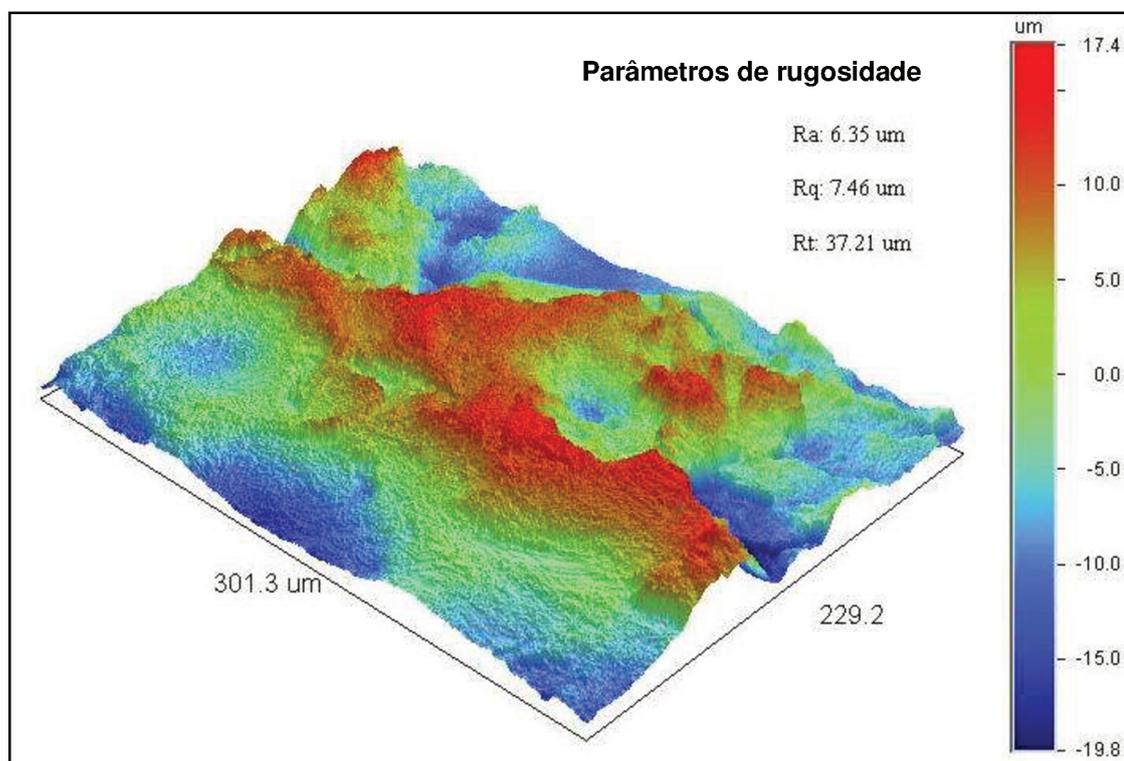


Figura 71 - Topografia da superfície da amostra de aço 300M-ESR (amostra 25), após jateamento abrasivo no equipamento 1 com granalha de aço de perfil angular GH-50, realizada por perfilometria óptica (Fonte: Autor)

6.1.3.2 Para o aço Maraging 18Ni300

Foi utilizada a amostra M20 que apresentou uma rugosidade média de 2,48 μm após tratamento térmico e de 4,51 μm após o jateamento abrasivo da superfície, conforme medição de rugosidade realizada com o rugosímetro portátil Taylor-Hobson, modelo Surtronic 3P. A topografia da superfície da amostra está detalhada nas Figuras 72 e 73. A área superficial real (A), após o tratamento superficial de jateamento abrasivo na amostra (Figura 73) foi medida pelo perfilômetro óptico em 0,090 mm^2 , sobre uma área efetiva (A_0) de 0,069 mm^2 (0,301 mm x 0,229 mm), o que dá um fator de rugosidade ($r = \frac{A}{A_0}$) igual a 1,30 para a superfície jateada da amostra de aço Maraging 18Ni300.

O Quadro 3 faz uma comparação entre os valores de rugosidade encontrados com o rugosímetro portátil com apalpador (sistema eletromecânico) e o perfilômetro óptico (sistema ótico) nas amostras ensaiadas. Os valores foram retirados das Tabelas 11, 12, 16,18 e das Figuras 70 a 73.

Quadro 2 - Comparação entre os valores de rugosidade Ra (μm) encontrados nas amostras pelos instrumentos eletromecânico e ótico

Amostra	Após tratamento térmico Rugosidade Ra (μm)		Após jateamento Rugosidade Ra (μm)	
	Rugosímetro eletromecânico	Perfilômetro óptico	Rugosímetro eletromecânico	Perfilômetro óptico
300M-ESR	4,02	4,36	6,73	6,35
Maraging 18Ni300	2,48	1,97	4,51	4,71

Os dados obtidos das amostras no perfilômetro óptico após jateamento abrasivo, indicam que o aço 300M-ESR sofre maior erosão na superfície ($A= 0,095 \text{ mm}^2$) do que o aço Maraging 18Ni300 ($A= 0,090 \text{ mm}^2$), em razão disso, sua área superficial é 5,55% maior.

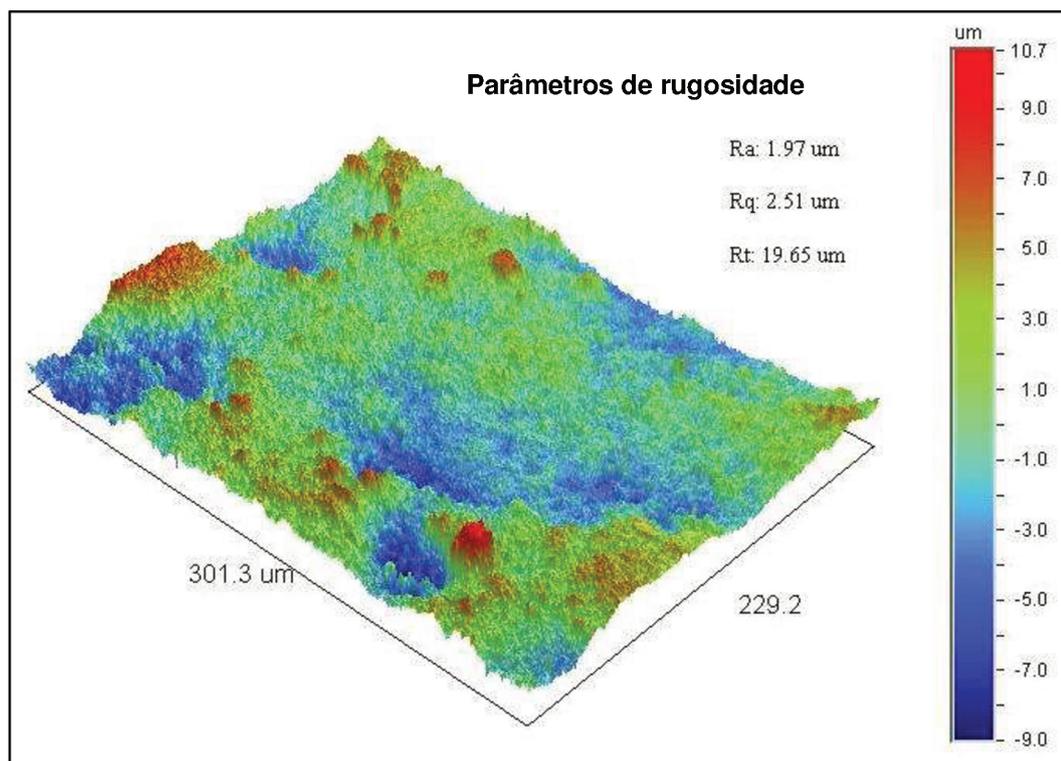


Figura 72 - Topografia da superfície da amostra de aço Maraging 18Ni300 (amostra M20), após tratamento térmico, realizada por perfilometria óptica (Fonte: Autor)

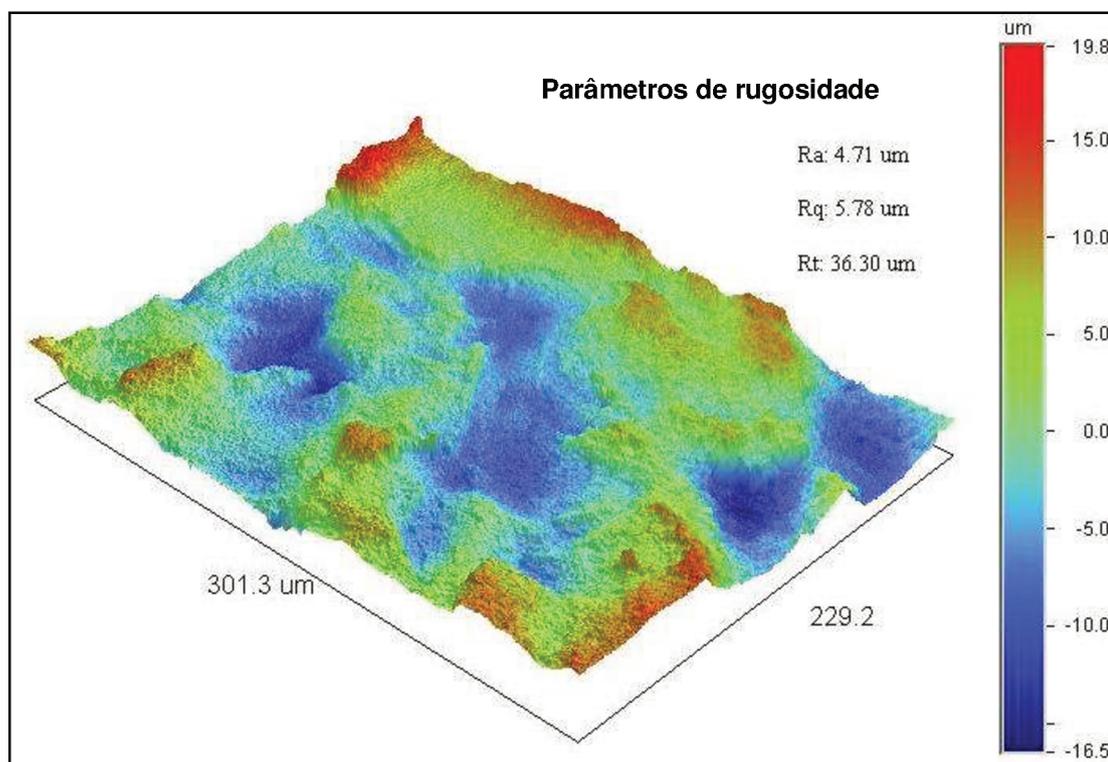


Figura 73 - Topografia da superfície da amostra de aço Maraging 18Ni300 (amostra M20), após jateamento abrasivo no equipamento 1 com granalha de aço de perfil angular GH-50, realizada por perfilometria óptica (Fonte: Autor)

6.1.4 Resultado da morfologia da superfície jateada

Foram utilizadas uma amostra de aço 300M-ESR (amostra 07) e uma amostra de aço Maraging 18Ni300 (amostra M01) jateadas com granalhas de aço de perfil angular GH-50 no equipamento 1.

Observa-se na amostra de aço 300M-ESR (Figura 74) uma superfície com áreas rugosas e lisas, sendo predominantes as áreas rugosas, onde o efeito de lascamento, causado pelo jateamento abrasivo com granalha de aço de perfil angular, apresenta o aspecto de uma fratura dúctil, permitindo a formação de vales superficiais, alguns pronunciados, que consistirão em sítios para uma ancoragem otimizada, o que conduziria a uma adesão mais resistente do ponto de vista mecânico.

Na amostra de aço Maraging 18Ni300 (Figura 75) observa-se uma superfície com áreas rugosas heterogêneas, onde o efeito de lascamento, causado pelo processo de jateamento abrasivo com granalha de aço de perfil angular, apresenta em algumas regiões mais claras o aspecto de clivagem do metal, permitindo a formação de vales superficiais, o que contribui para uma adesão mais resistente do ponto de vista mecânico.

Quadro 3 - Comparação da morfologia da superfície jateada das amostras

300M-ESR	Maraging 18Ni300
Áreas rugosas e lisas	Áreas rugosas heterogêneas
Fratura dúctil	Clivagem do metal
Vales superficiais	Vales superficiais

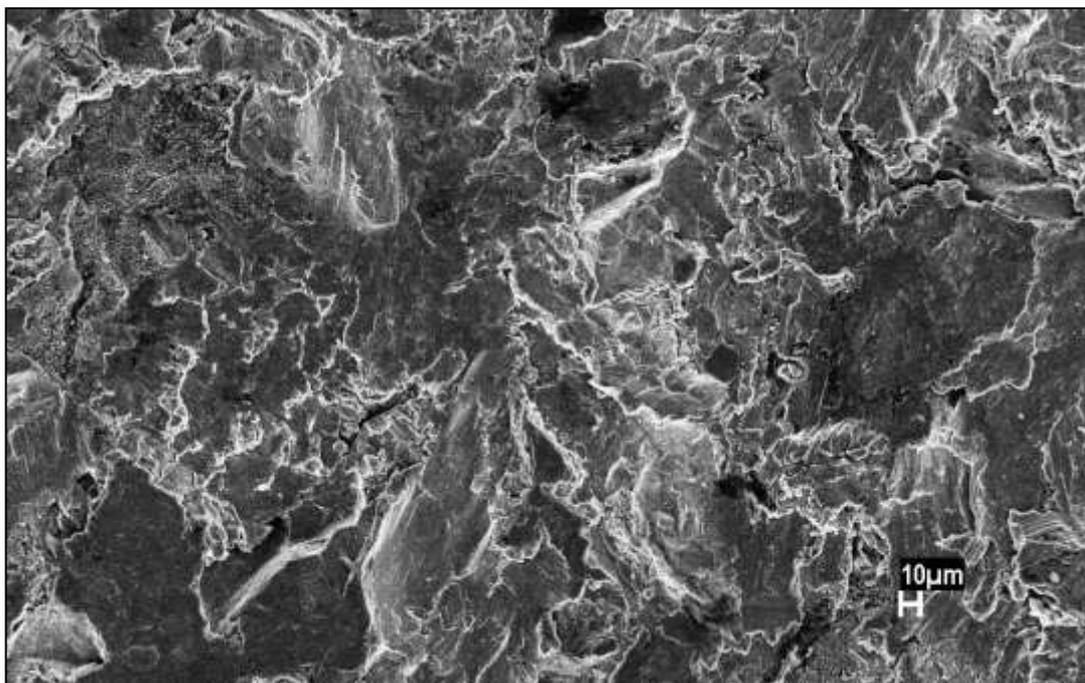


Figura 74 – Fotomicrografia. Aumento:600x . Superfície jateada da amostra de aço 300M-ESR
(Fonte: Autor)

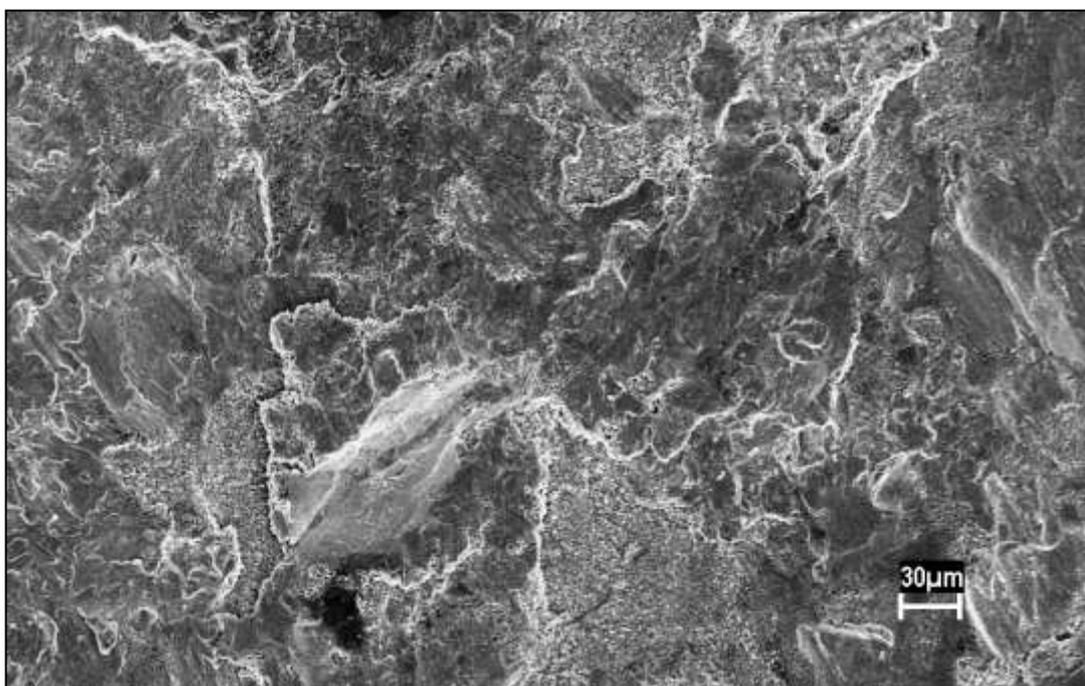


Figura 75 – Fotomicrografia. Aumento 600x. Superfície jateada da amostra de aço Maraging18Ni300
(Fonte: Autor)

6.2 Influência das Variáveis Intervenientes do processo de jateamento

Foi verificada a influência de três variáveis intervenientes do processo de tratamento superficial de jateamento abrasivo que sofreram variações durante os experimentos realizados com as amostras de aço 300M-ESR e Maraging 18Ni300 nos equipamentos 1 e 2 de jateamento abrasivo. Essas variáveis são: vazão de granalha, ângulo de incidência da granalha e a condição da granalha (partícula abrasiva). A influência dessas variáveis sobre a variável dependente (rugosidade superficial) estão representadas através de gráficos.

6.2.1 Para o equipamento 1 de jateamento abrasivo

A influência dos parâmetros de processo: vazão de granalha e ângulo de incidência da granalha para as amostras de aço 300M-ESR e Maraging 18Ni300 estão representadas nos gráficos das Figuras 76 e 77 (dados retirados da Tabela 20).

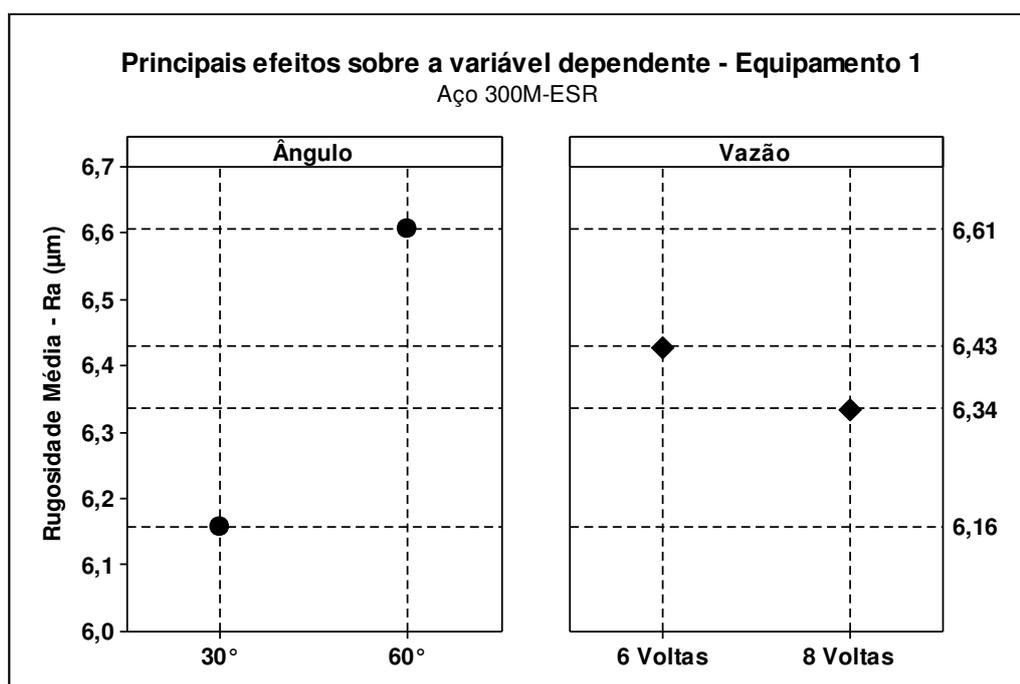


Figura 76 - Gráfico dos efeitos da vazão e do ângulo de incidência da granalha sobre a variável dependente para o aço 300M-ESR (Fonte: Autor)

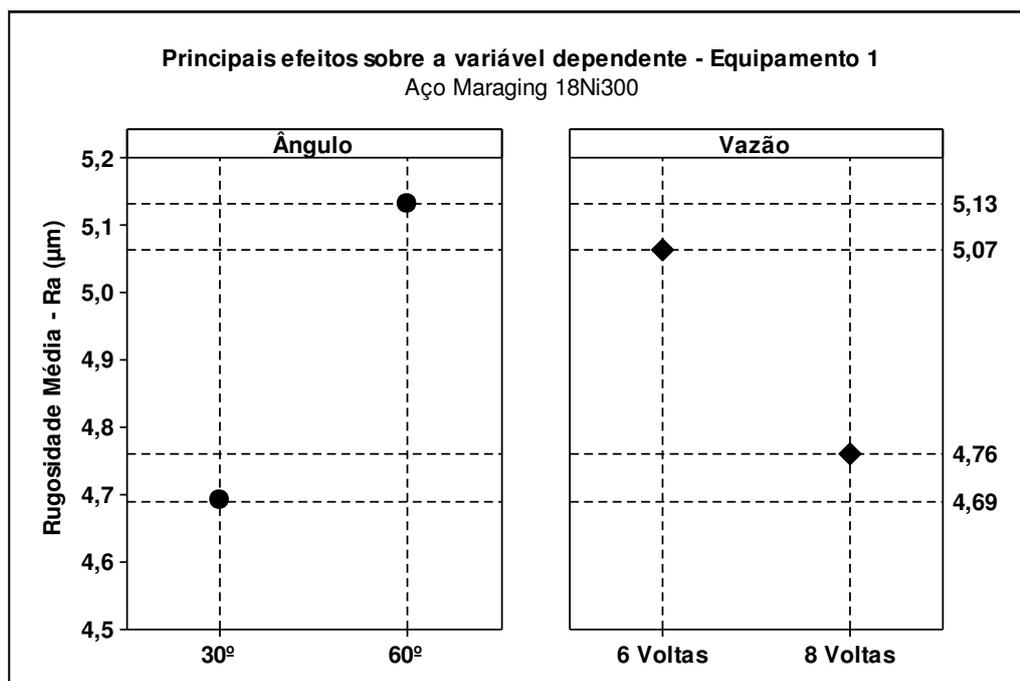


Figura 77 - Gráfico dos efeitos da vazão e do ângulo de incidência da granalha sobre a variável dependente para o aço Maraging 18Ni300 (Fonte: Autor)

Pode-se observar, no processo de tratamento superficial de jateamento abrasivo aplicado pelo equipamento 1 nas superfícies das amostras de aço 300M-ESR e Maraging18Ni300, que a variável de maior influência no processo é o ângulo de incidência da granalha, enquanto que a variável vazão de granalha tem uma influência bastante reduzida.

6.2.2 Para o equipamento 2 de jateamento abrasivo

A influência dos parâmetros de processo, vazão de granalha e ângulo de incidência da granalha, para as amostras de aço 300M-ESR e Maraging 18Ni300 estão representadas nos gráficos das Figuras 78 e 79 (dados retirados da Tabela 25).

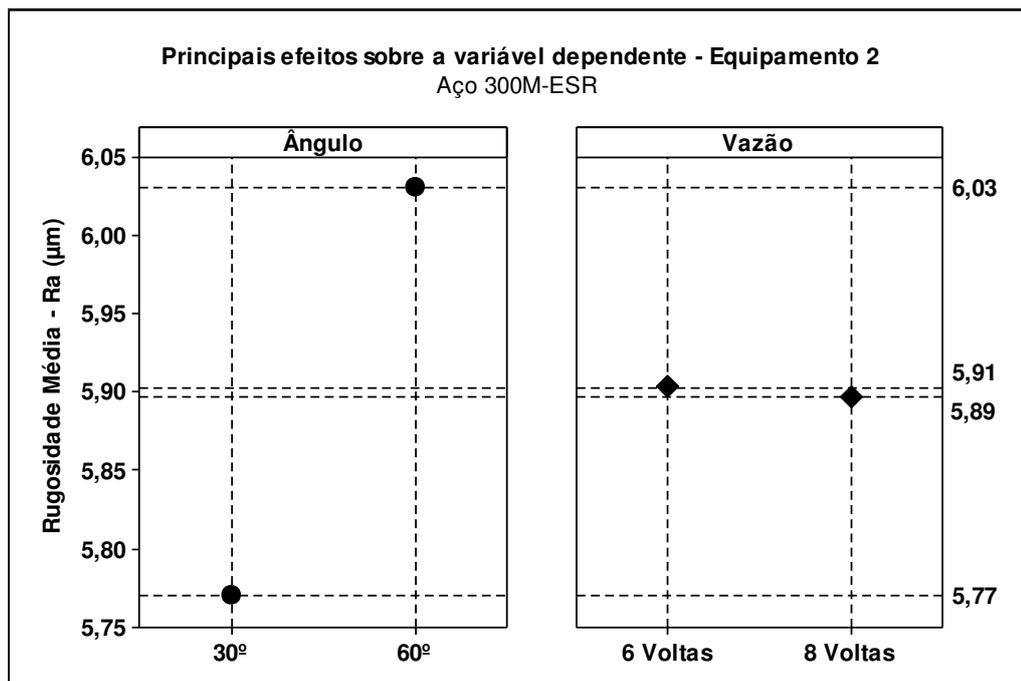


Figura 78 - Gráfico dos efeitos da vazão e do ângulo de incidência da granalha sobre a variável dependente para o aço 300M-ESR (Fonte: Autor)

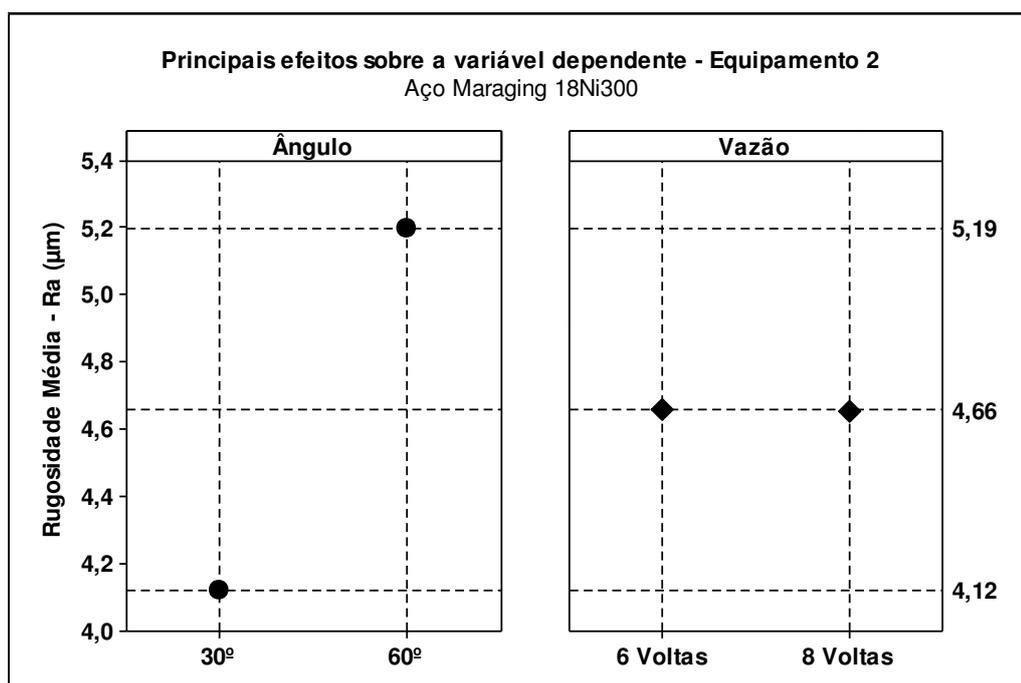


Figura 79 - Gráfico dos efeitos da vazão e do ângulo de incidência da granalha sobre a variável dependente para o aço Maraging 18Ni300 (Fonte: Autor)

A exemplo do observado no processo de jateamento abrasivo no equipamento 1, que apresentou a predominância de uma variável sobre a outra, o processo (jateamento abrasivo) no equipamento 2 também mostra que a variável ângulo de incidência da granalha é praticamente a única que tem influência sobre a rugosidade

superficial, com a variável vazão da granalha apresentando influência praticamente nula sobre a rugosidade.

6.2.3 Influência da condição da granalha

A influência da condição da granalha (partícula abrasiva) sobre a variável dependente está graficamente representada pelas Figuras 80 e 81 (dados retirados das Tabelas 20 e 25). Observa-se que, apesar da granalha “Nova” apresentar para os dois tipos de aço um valor médio de rugosidade superior ao da granalha “Usada”, essa diferença não chega a ser estatisticamente significativa.

Isso significa que para o processo atual de tratamento superficial de jateamento abrasivo não haveria a necessidade de se fazer um controle rigoroso sobre a granulometria das partículas abrasivas. Esse controle poderia ser feito a cada três anos, mesmo tempo de uso das partículas abrasivas da granalha na condição “Usada”.

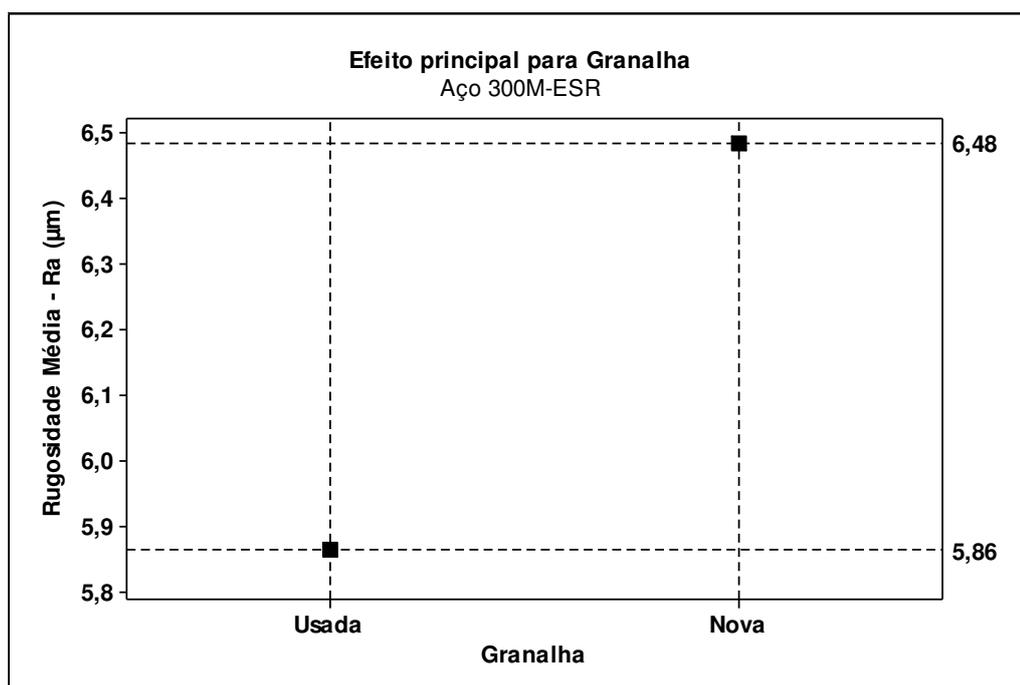


Figura 80 - Gráfico da influência da condição da granalha (partícula abrasiva) sobre a rugosidade superficial do aço 300M-ESR (Fonte: Autor)

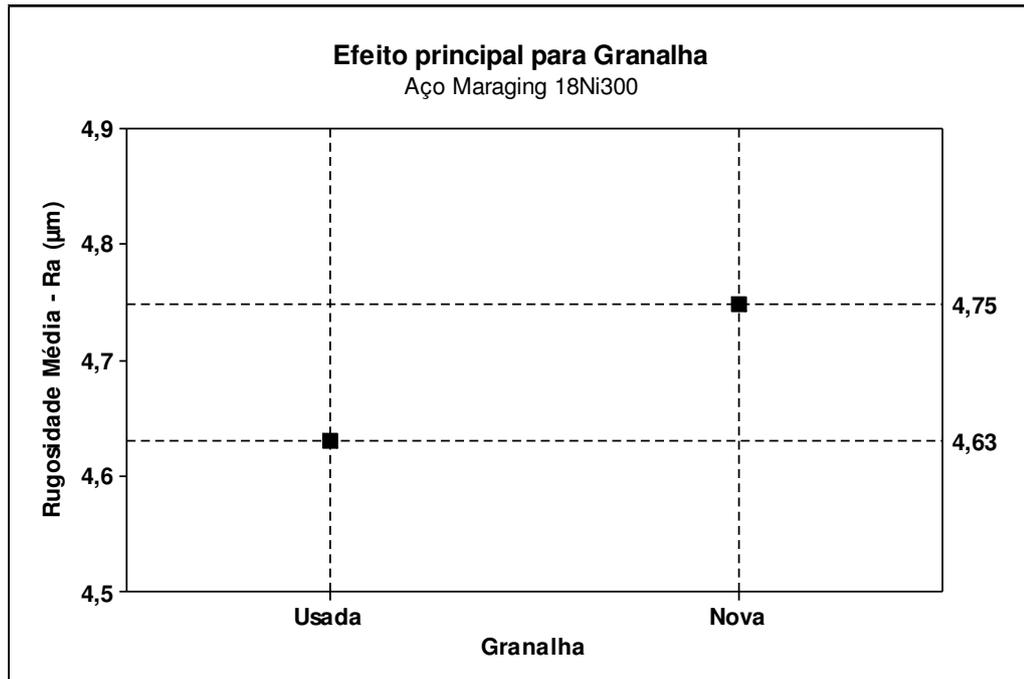


Figura 81 - Gráfico da influência da condição da granalha (partícula abrasiva) sobre a rugosidade superficial do aço Maraging 18Ni300 (Fonte: Autor)

6.3 Resistência Mecânica da Interface Colada

As Tabelas 26 e 27 relacionam os experimentos e as respectivas amostras de aço que foram selecionadas para receberem a aderência do isolante térmico que, no caso em questão, trata-se de uma placa de carbono com resina fenólica, o mesmo tipo de material utilizado como isolante térmico no domo traseiro do envelope motor foguete de 1.000 mm de diâmetro. O critério adotado para a escolha das amostras é detalhado no item 5.3.1.

Tabela 26 - Relação das amostras de aço preparadas superficialmente no equipamento 1 de jateamento e selecionadas como substrato na junta adesivada.

Material	Experimento	Amostra	Rugosidade média Ra (μm)
300M-ESR	$\mu_{4,1}$	12/25/8	6,66 \pm 0,18
	$\mu_{5,1}$	5/15/6	6,01 \pm 0,18
Maraging18Ni300	$\mu_{2,2}$	M04/M06/M26	5,45 \pm 0,32
	$\mu_{3,2}$	M10/M16/M24	4,68 \pm 0,63

Tabela 27- Relação das amostras de aço preparadas superficialmente no equipamento 2 de jateamento e selecionadas como substrato na junta adesivada.

Material	Experimento	Amostra	Rugosidade média Ra (μm)
300M-ESR	$\mu_{8,1}$	19/20/21	6,07 \pm 0,18
	$\mu_{9,1}$	14/16/17	5,71 \pm 0,27
Maraging18Ni300	$\mu_{8,2}$	M17/M19/M22	5,22 \pm 0,30
	$\mu_{9,2}$	M12/M14/M15	4,09 \pm 0,23

6.3.1 Resultado do ensaio mecânico de cisalhamento

Utilizou-se no ensaio uma garra de fixação com capacidade de 500 KN (Figura 82) e procedimento de ensaio adaptado da norma ASTM D1002-05 (ASTM, 2005). Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente (24°C) e umidade relativa do ar em 41%.

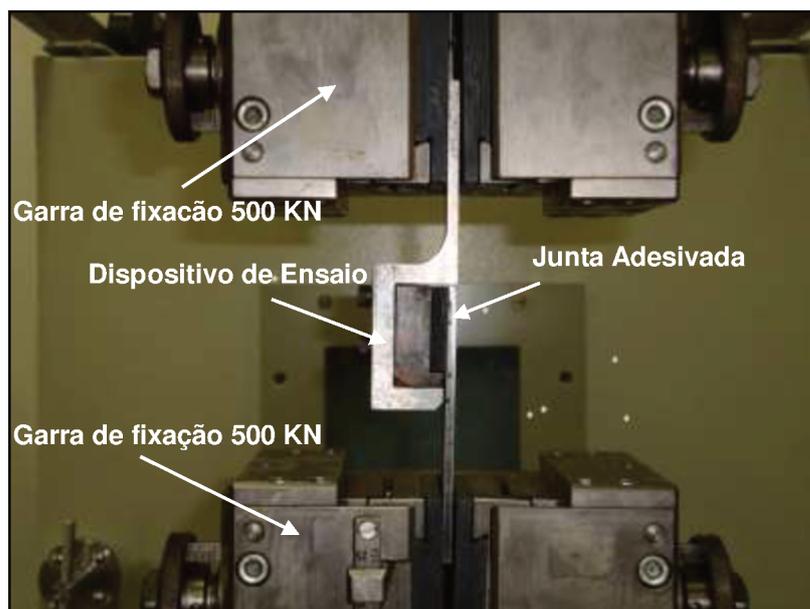


Figura 82 - Fixação da junta adesivada no dispositivo de ensaio (Fonte:DCTA/IAE)

Os dados obtidos do ensaio mecânico de cisalhamento nas juntas adesivadas estão detalhados nas Tabelas 28 e 29. Os resultados estão classificados em função do experimento realizado e do equipamento de jateamento utilizado (equipamento 1 e 2). A tensão de cisalhamento obtida no ensaio é resultado da força aplicada pela área total de colagem da junta adesivada. As Figuras 83 e 84 representam o intervalo de confiança (nível de significância de 5%) da tensão média de cisalhamento (MPa) para os substratos de aço preparados superficialmente nos equipamentos 1 e 2.

Tabela 28 - Resistência mecânica da junta adesivada com substrato em aço 300M-ESR tratado superficialmente no equipamento 1 de jateamento

Experimento	Amostra 300M	Rugosidade Média Ra (μm)	Tensão Máxima (MPa)	Tensão Média (MPa)
$\mu_{4,1}$	12		2,20	2,29\pm0,31
	25	6,66 \pm 0,18	2,07	
	8		2,61	
$\mu_{5,1}$	5		2,66	2,75\pm0,31
	15	6,01 \pm 0,18	2,88	
	6		2,72	

Tabela 29 - Resistência mecânica da junta adesivada com substrato em aço Maraging 18Ni300 tratado superficialmente no equipamento 1 de jateamento

Experimento	Amostra Maraging	Rugosidade Média Ra (μm)	Tensão Máxima (MPa)	Tensão Média (MPa)
$\mu_{2,2}$	M04		1,61	
	M06	$5,45 \pm 0,32$	2,27	$1,96 \pm 0,30$
	M26		1,99	
$\mu_{3,2}$	M10		2,22	
	M16	$4,68 \pm 0,63$	2,17	$2,26 \pm 0,30$
	M24		2,38	

Relatório RE PPM Nº A18-10 (Anexo V)

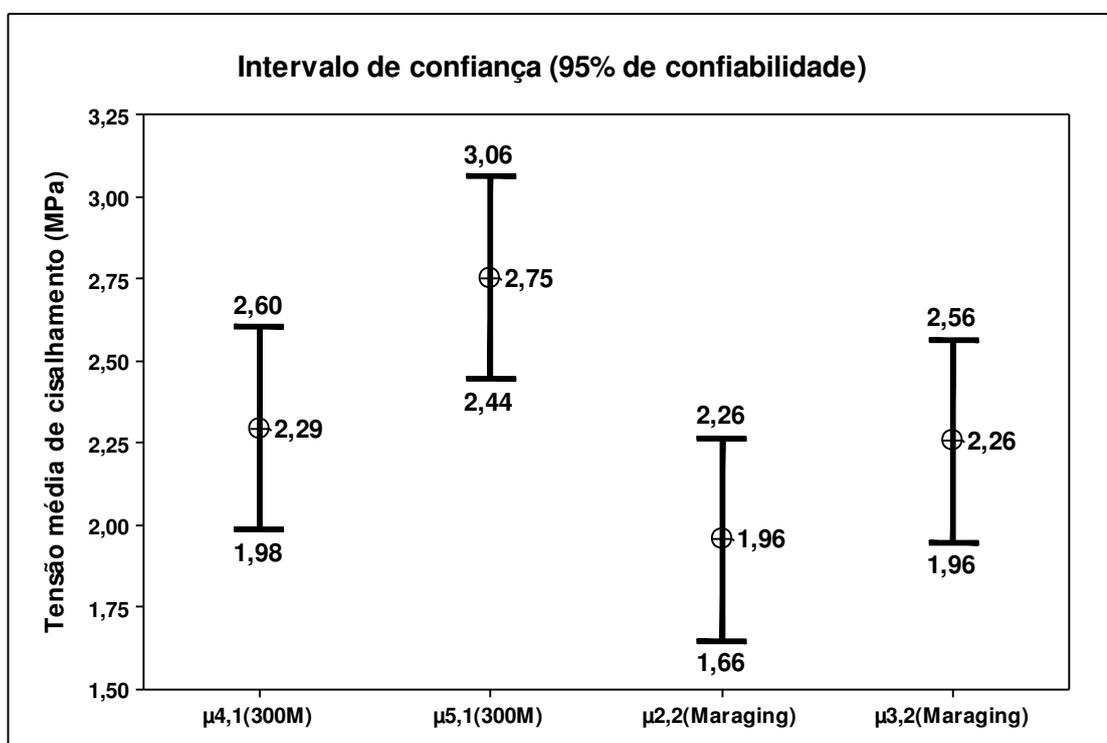


Figura 83 – Gráfico de intervalo de confiança para a tensão média de cisalhamento (MPa) na interface colada com substratos metálicos tratados superficialmente no equipamento 1 de jateamento

Tabela 30 - Resistência mecânica da junta adesivada com substrato em aço 300M-ESR tratado superficialmente no equipamento 2 de jateamento

Experimento	Amostra 300M	Rugosidade Média Ra (μm)	Tensão Máxima (MPa)	Tensão Média (MPa)
$\mu_{8,1}$	19		2,75	2,63±0,40
	20	6,07±0,18	2,81	
	21		2,33	
$\mu_{9,1}$	14		2,32	2,40±0,40
	16	5,71±0,27	2,68	
	17		2,21	

Relatório RE PPM N° A17-10 (Anexo V)

Tabela 31 - Resistência mecânica da junta adesivada com substrato em aço Maraging 18Ni300 tratado superficialmente no equipamento 2 de jateamento

Experimento	Amostra	Rugosidade Média Ra (μm)	Tensão Máxima (MPa)	Tensão Média (MPa)
$\mu_{8,2}$	M17		2,52	2,32±0,40
	M19	5,22±0,30	2,20	
	M22		2,25	
$\mu_{9,2}$	M12		2,79	2,45±0,40
	M14	4,09±0,23	2,63	
	M15		1,93	

Relatório RE PPM N° A18-10 (Anexo VI)

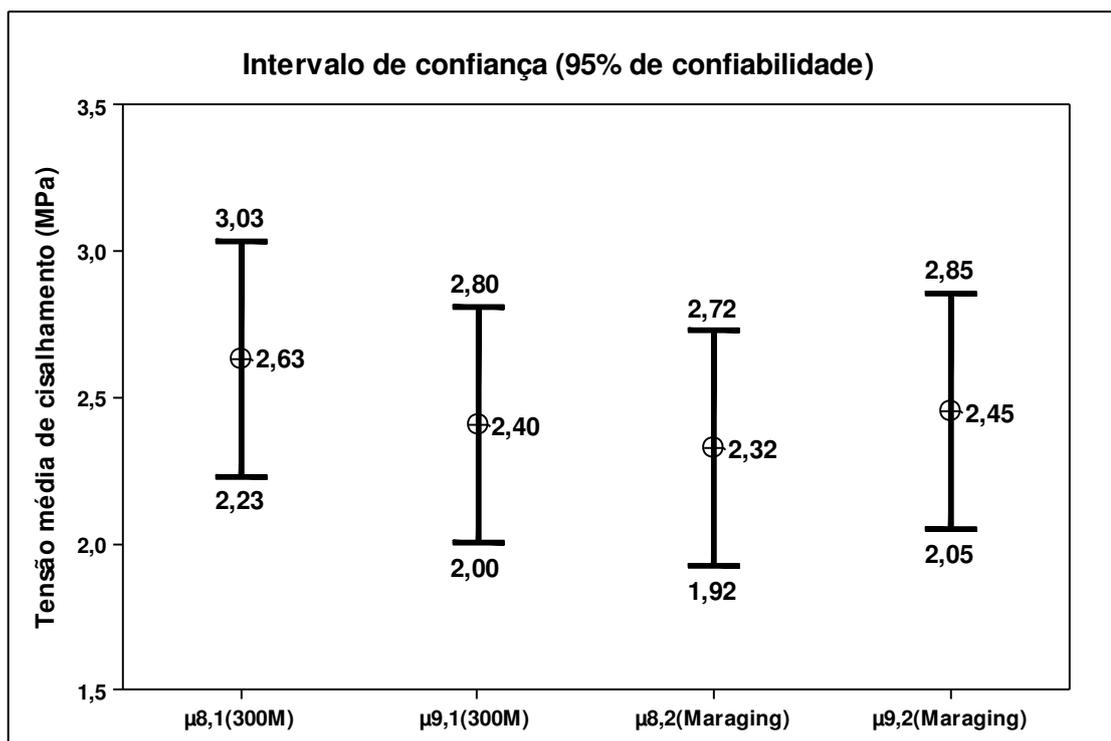


Figura 84 – Gráfico de intervalo de confiança para a tensão média de cisalhamento (MPa) na interface colada com substratos metálicos tratados superficialmente no equipamento 2 de jateamento

A aplicação da análise de variância (ANOVA), ao nível de significância de 5%, nos dados das Tabelas 28 a 31 (memoria de cálculo não publicada) indica que as diferenças entre as tensões média de ruptura na interface colada para os dois tipos de substratos metálicos preparados superficialmente nos equipamentos 1 e 2 de jateamento não são estatisticamente significativas, ou seja, a superfície metálica de cada aço pode ser preparada tanto no equipamento 1 como no equipamento 2, sem que ocorra uma perda significativa de resistência mecânica nessa região.

6.3.2 Tipo de falha ocorrida na interface colada

No ensaio mecânico de cisalhamento realizado nas vinte e quatro juntas adesivadas, todas as falhas que ocorreram foram do tipo 2, ou seja, adesiva na interface com o substrato metálico conforme Figuras 85 e 86. Pode-se verificar que a camada de adesivo ficou totalmente aderida à superfície da placa de carbono, enquanto na superfície do substrato metálico não ficou nenhum filme residual do adesivo.

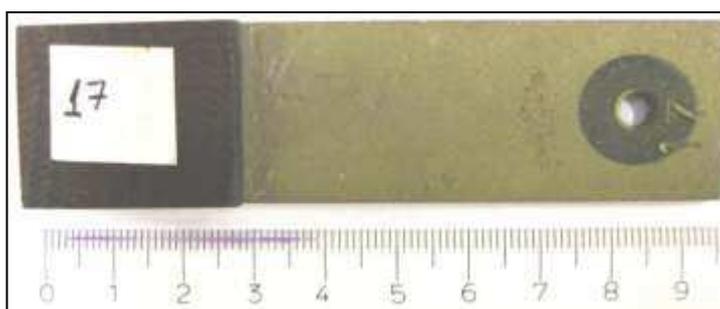


Figura 85 - Junta adesivada antes do ensaio de cisalhamento (Fonte: Autor)



Figura 86 - Falha adesiva na interface colada metal/carbono após ensaio de cisalhamento. Pode-se observar que todo o filme de adesivo ficou aderido à superfície da placa de carbono (Fonte: Autor)

6.4 Análise dos dados do Ensaio de Cisalhamento

Dos gráficos de intervalo de confiança das Figuras 83 e 84 pode-se concluir que, para cada tipo de aço, existe um intervalo de resistência mecânica na interface colada da junta adesivada, que corresponde ao processo de preparação da superfície naquele equipamento especificamente, e que pode ser interpretado como o intervalo de resistência mecânica do processo. As Tabelas 32 e 33 resumem essa faixa de resistência mecânica para cada equipamento e tipo de aço.

Tabela 32 - Intervalo de resistência mecânica para o processo de preparação de superfície no equipamento 1 de jateamento abrasivo

Equipamento 1	
Material	Tensão de cisalhamento Interface colada (MPa)
300M-ESR	1,98 a 3,06
Maraging 18Ni300	1,66 a 2,56

Tabela 33 - Intervalo de resistência mecânica para o processo de preparação de superfície no equipamento 2 de jateamento abrasivo

Equipamento 2	
Material	Tensão de cisalhamento Interface colada (MPa)
300M-ESR	2,00 a 3,03
Maraging 18Ni300	1,92 a 2,85

É possível verificar nos dados apresentados nas tabelas acima que existe uma região de intersecção (Figuras 87 e 88) entre os valores da resistência mecânica dos aços 300M-ESR e Maraging 18Ni300 obtidos para cada equipamento de jateamento.

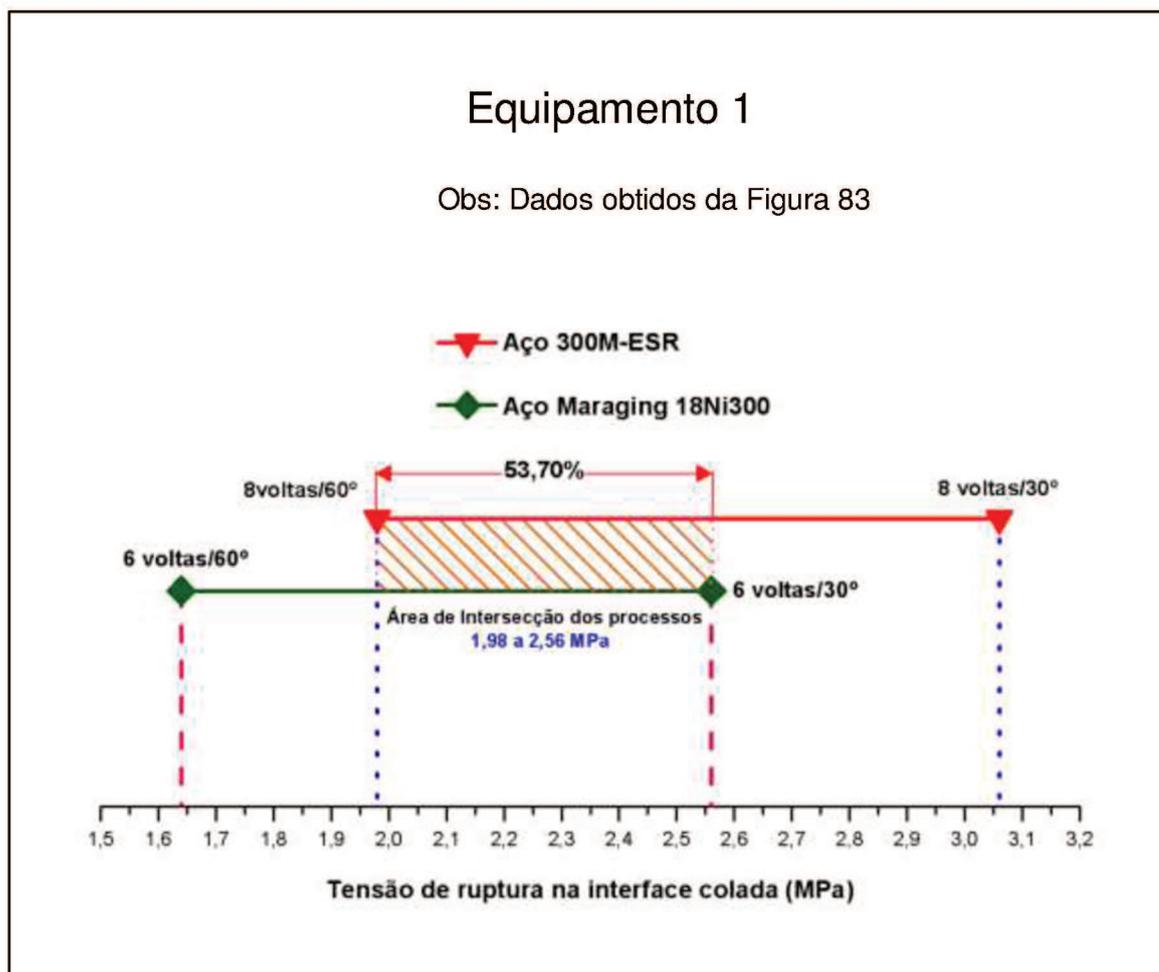


Figura 87 - Gráfico representativo da tensão de ruptura na interface colada para o equipamento 1 de jateamento (Fonte: Autor)

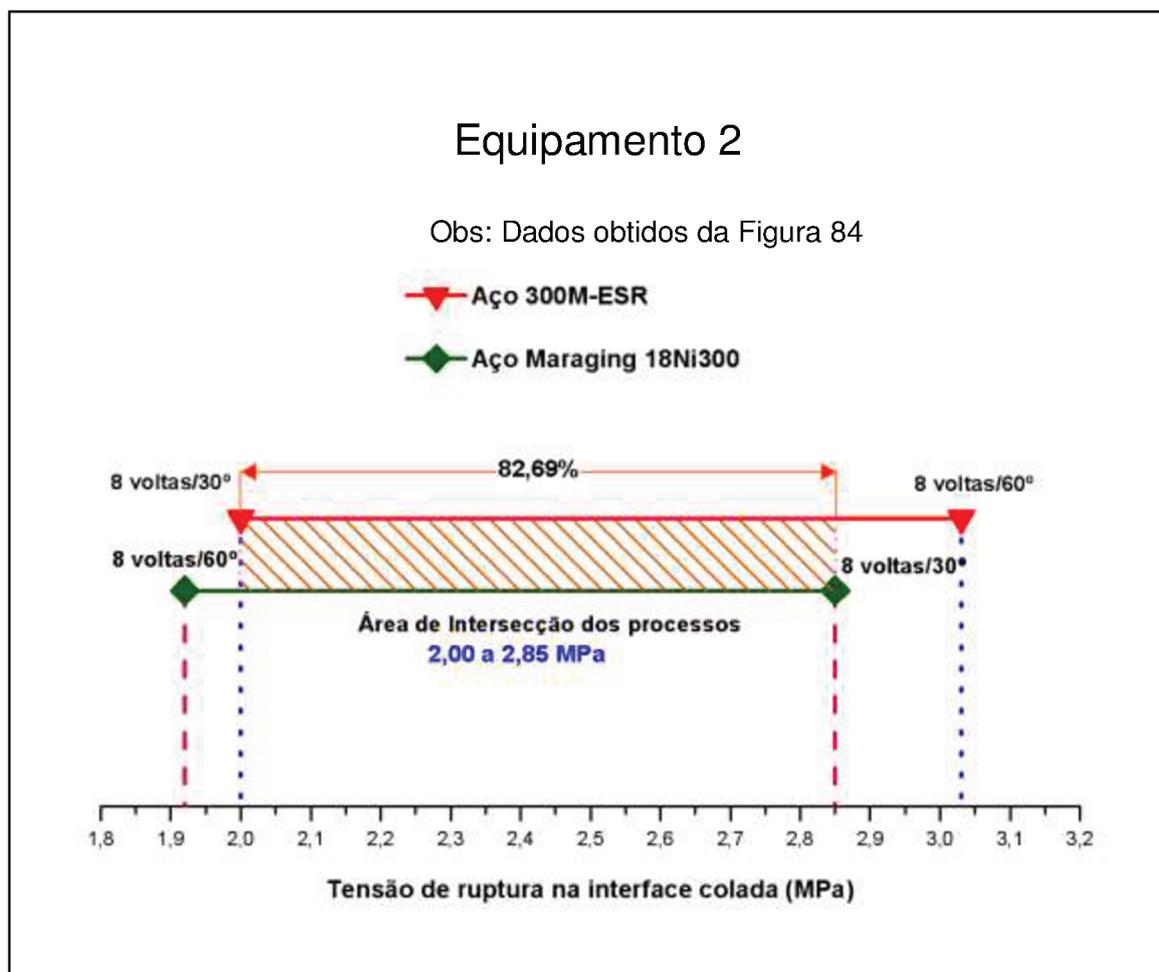


Figura 88 - Gráfico representativo da tensão de ruptura na interface colada para o equipamento 2 de jateamento (Fonte: Autor)

Dos dados acima (Figuras 87 e 88) pode-se verificar que para o equipamento 1 o processo adotado para o aço Maraging 18Ni300 corresponde a 53,70% do intervalo de resistência mecânica obtido para o aço 300M-ESR. Para o equipamento 2 o processo aplicado ao aço Maraging 18Ni300 atinge 82,69% do intervalo de resistência mecânica obtido para o aço 300M-ESR.

7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1 Conclusões

De acordo com a metodologia empregada e a análise dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se chegar às seguintes conclusões:

Com relação ao objetivo principal:

Conclui-se que o processo atual de preparação de superfície para aderência de isolantes térmicos em envelopes motores de 1.000 mm de diâmetros executados pelos equipamentos 1 e 2 de jateamento abrasivo pode ser empregado para a preparação da superfície do aço Maraging 18Ni300, sem que haja necessidade de mudanças nos equipamentos e parâmetros de processo atualmente em uso, visto que, os resultados obtidos nos experimentos mostraram que, para cada equipamento de jateamento, existe um significativo intervalo em comum de resistência mecânica na interface colada metal/isolante térmico entre os dois aços (conforme pode ser observado nos gráficos das Figuras 87 e 88).

Com relação aos objetivos específicos desse trabalho, concluiu-se que:

- Existe uma diferença inicial e significativa de textura entre as superfícies dos aços 300M-ESR e Maraging 18Ni300 situada entre 1,47 μm e 1,97 μm .
- O nível máximo de rugosidade após jateamento abrasivo é obtido no equipamento 1 para os dois tipos de aço. Sendo que a diferença entre esses valores ($\mu_{4,1} = \mu_{2,2}$) não é estatisticamente significativa.
- Entre as três variáveis intervenientes do processo analisadas nos dois equipamentos de jateamento disponíveis: vazão de granalha, ângulo de incidência da granalha e condição da granalha, as que apresentaram maior influência sobre a rugosidade superficial foram as variáveis ângulo de incidência da granalha e condição da granalha. A variável vazão de granalha teve influência insignificante para o processo.
- A diferença existente entre os valores de resistência mecânica adesiva obtida para os substratos em aços 300M-ESR e Maraging 18Ni300, preparados por jateamento abrasivo nos equipamentos 1 e 2, não são estatisticamente significativos, o que significa que, na impossibilidade de utilização do equipamento 1, pode-se utilizar o equipamento 2 sem que ocorra prejuízo da resistência mecânica na interface colada.

7.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Realizar um trabalho de preparação de superfície nos dois equipamentos de jateamento disponíveis para essa função com um número maior de amostras de aço Maraging 18Ni300 e utilizando-se dos parâmetros atuais de processo, com o objetivo de diminuir a variância nos resultados obtidos e determinar com maior precisão o intervalo da resistência mecânica na interface colada metal/isolante térmico para esse substrato metálico.
- Executar estudo para determinar a correlação entre a rugosidade superficial do substrato metálico e a resistência mecânica adesiva na interface colada metal/isolante térmico.
- Realizar trabalho idêntico, porém ao longo de toda a superfície da peça, devido à sua geometria e comparar os resultados obtidos em uma única seção.

8. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO AEROESPACIAL BRASILEIRA. AAB ***Cronologia Resumida do Programa Espacial Brasileiro***. Citado em: 23 de Outubro de 2009. <http://www.aeroespacial.org.br>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR ISO 4287 "Especificações geométricas de produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade"**, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR ISO 4288 "Especificações geométricas de produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade"**, 2008.

ALLEN, K. W. **Mechanical Theory of Adhesion**. D. E. PACKHAM. *Handbook of Adhesion - Second Edition*. Bath : John Wiley & Sons Ltd, 2005.

ALVES, Adilson José. *Dissertação de Mestrado: Estudo do Efeito do Tratamento Corona em Superfícies de filmes EPDM/PP através de medidas de Ângulo de Contato*. Campinas : Faculdade de Engenharia Química - UNICAMP, 2003.

ANAZAWA, R.M. Tese de Doutorado. **"Caracterização Mecânica e Microestrutural de uma Aço 300M com Microestrutura Multifásica"**. Unesp - Guaratinguetá : Biblioteca Digital de Teses e Dissertações - Unesp, 2007.

ASM INTERNACIONAL - Metals Handbook. **"Ultrahigh Strength Steels" vol 1 pg 708-709. Carbon and Low-Alloy Steels**. Metals Park, OHIO : 10ª Edição, 1990.

—. 1990. Metals Handbook **"Ultrahigh Strength Steels" vol 1 pg 708. Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys**. Metals Park, OHIO : 10ª Edição, 1990.

—. 1990. Metals Handbook **"Specialty Steels and Heat-Resistant Alloys" vol 1 pg 1225. Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys**. Metals Park - OHIO : 10ª Edição, 1990.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, **ASME B46.1 - Surface Texture (Surface roughness, Waviness, and Lay)**, 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, **ASTM -D 4126-02: Standard Specification for Vapor-Degreasing Grade and General Solvent Grade 1,1,1-Trichloroethane**, ASTM International, 2002.

—. 1999. **ASTM D 907-08b "Standard Terminology of Adhesives"**. Philadelphia : ASTM International, 1999.

—. 2005. **ASTM D1002-05: "Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)**, ASTM International, 2005.

—. 2003. **ASTM D3164-03: Standard Test Method for Strength Properties of Adhesively Bonded Plastic Lap-Shear Sandwich Joints in Shear by Tension Loading**, ASTM International, 2003.

AWAJA, Firas e Michael Gilbert, Georgina Kelly. **Adhesion of Polymers pg 951**. *Progress in Polymer Science*. 2009, Vol. 34.

BHUSHAN, Bharat. **Surface Roughness Analysis and Measurement Techniques**. CRC. *Modern Tribology Handbook*, CRC PRESS LLC, 2001.

BICO, José. *Tese de Doutorado: Mécanismes d'imprégnation : Surfaces texturées, bigouttes, poreux*. Paris : Universidade de Paris, 2000.

BOSCOV, J. e Damant, P. **Simpósio:"Rocket Motor Cases in 300M Steel - A Pioneer Development Performed in the Brazilian Space Programme"**. Loen - Norway : ESA SP-229, 1985.

BOSCOV, J. **Foguetes de Sondagem. 1º Curso de Tecnologia Espacial**. Brasília : Agência Espacial Brasileira, 1996.

BURKARTER, Ezequiel. *Dissertação de Mestrado: Construção de Imagens por Padrões Hidrofóbico/Hidrofílico*. Curitiba : Universidade Federal do Paraná, 2006.

CAMARGO, R. **"Rugosidade Superficial nas Operações de Torneamento"**. Santa Bárbara D'Oeste : SENAI, 2002.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços Ultra-Resistentes, Aços Grafíticos e Aços Criogênicos. Aços e Ferros Fundidos**. São Paulo : Associação Brasileira de Metais, 1987.

COUTINHO, Murilo Pereira. *Dissertação de Mestrado: Influência da Morfologia da Superfície na Molhabilidade do Titânio Comercialmente Puro*. Rio de Janeiro : Instituto Militar de Engenharia - IME, 2007.

FACCIO, Ian. *Tese de Mestrado:"Investigação sobre o acabamento superficial de usinagens com altíssima velocidade de corte"*. São Paulo : Escola Politécnica - Universidade de São Paulo, 2002.

FIELD, Michael, kahles, John F. e koster, William P. **Metal Handbook "Surface Finish and Surface Integrity"**. ASM INTERNACIONAL. *Machining volume 16 pg 43 - 84*. 1991.

FURUSE, Adilson Yoshio. *Dissertação de Mestrado: Efeito de Diferentes Tratamentos de Superfície na Resistência de União Adesiva em Resina Composta Contaminada por Saliva*. Bauru : Universidade de São Paulo, 2005.

GNECCO, Celso, Mariano, Roberto e Fernandes, Fernando. *Tratamento de Superfície e Pintura*. Rio de Janeiro : Instituto Brasileiro de Siderurgia, 2003.

GONZÁLEZ, Ricardo V. B. *Rugosidade Superficial - Uma abordagem prática*. São Paulo : Mitutoyo, 1998.

IKK do BRASIL. Granalhas Angulares. *Site da IKK do Brasil*. Citado em: 18 de Outubro de 2010 www.ikkdobrasil.com.br/index.php?pg=univers&uni_id=6.

ISO 8501-1. *"Part 1: Rust grades and preparation grades of uncoated steel"*. s.l. : ISO - International Standards, 2007.

JOHNSON, R. E. e Dettre, R. H. *Wettability: Wetting of Low - Energy Surfaces*. New York : Marcel Dekker, 1993.

KINLOCH, A.J. *Surface Pretreatments. Adhesion and Adhesives*. Londres : Imperial College of Science and Technology, 1986.

LIMAVERDE, A. M., et al. *Estudo da Influência de Diferentes Tratamentos Superficiais na Resistência Mecânica de Juntas de Aço Carbono coladas com Adesivo Epóxi*. Foz do Iguaçu - PR : 17º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2006.

LOPES, L.V., et al. *"Determinação do ciclo de tratamento térmico de estruturas leves em aço 300M para emprego aeroespacial"*. 5º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Porto Alegre - RS, 1982.

LUZ, A. P., Ribeiro, S. R. e Pandolfelli, V. C. *Uso da molhabilidade na investigação do comportamento de corrosão de materiais refratários p.174 - 183*, 2008.

MORAES, A. M. F. e Pinto, J. R. A. *"Otimização da adesão em motor foguete a propelente sólido"*. Rio de Janeiro : Instituto de Pesquisas da Marinha, 2005. 5º Encontro Técnico de Materiais e Química.

MOREIRA, Clóvis Tadeu Antunes. *Tese de Mestrado: "Corrosão do aço 300M em 1,1,1-Tricloroetano"*. São José dos Campos - SP : ITA - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 1997.

MORRA, M., Occhiello, E. e Garbassi, F. *Knowledge about Polymer Surfaces from Contact Angle Measurements p. 79. Advances in Colloid and Interface Science*. 1990, 32.

MORTON, R.K. Metal Handbook **"Topography of Surface"**. ASM INTERNACIONAL. *Surface Engineering volume 5* pg.136-138. 1991.

MUMMERY, Leigh. **Surface Texture Analysis : The Handbook**. Hommelwerke : 1992.

MYSHKIN, N. K., Petrokovets, M.I. e Chizhik, S.A. **Simulation of real contact in tribology** pp 79-86. *Tribology Internacional*. 1998, Vol. 31, 1-3.

NICOLAIEWSKY, Elioni M. de A., Costa, Cristina L. C. e Oliveira, José F. de **"Efeito do tratamento de superfície na molhabilidade de recheios estruturados"**. Águas de São Pedro - SP : XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2000.

PACKHAM, D. E. **Surface Energy, Surface Topography and Adhesion** pg 437-438. *International Journal of Adhesion & Adhesives*. 2003, 23.

—. 2006. **The Mechanical Theory of Adhesion - Seventy year perspective and its current status**. Claverton Down : University of Bath, 2006.

PADIAL, Armando Guilherme Fernandes. *Tese de Doutorado: "Caracterização Microestrutural do Aço Maraging de Grau 400 de Resistência Mecânica Ultra-Elevada"*. São Paulo : USP - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2002.

PALMA, E. S. *Apostila :Metrologia pg 110 a 121* : PUC MINAS, 2006.

PROGRAMA NACIONAL DE ATIVIDADES ESPACIAIS **PNAE. Agência Espacial Brasileira**. Citado em: 20 de Fevereiro de 2010 http://www.aeb.gov.br/download/PDF/pnae_web.pdf.

ROSA, Luiz Carlos. **Acabamento de Superfícies: Rugosidade Superficial**. Sorocaba/lperó : UNESP , 2007.

ROSARIO, John Ferney Alvarez. *Tese de Mestrado: "Avaliação da integridade da superfície no torneamento de um ferro fundido nodular com carboneto"* :Escola Politécnica - USP, 2006.

SAE- J444. Surface Vehicle Recommended Practice. SAE International. *Cast Shot and Grit Size Specifications for Peening and Cleaning*. 1993.

SAE- J827. Surface Vehicle Recommended Practice. SAE International. *High-Carbon Cast-Steel Shot*. 2005.

SAKAI, P. R., et al. **"Análise da deformação de envelopes motores-foguete devido à ação do tratamento térmico"**. 17^o CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Foz do Iguaçu - PR, 2006.

SANTOS, Dalcy Roberto. *Tese de Mestrado: "Otimização dos parâmetros de tratamento térmico e soldagem do aço Maraging 18Ni300"*. Guaratinguetá : UNESP - Campus de Guaratinguetá, 2001.

SCHULTZ, J. e Nardin, M. **Theories and Mechanisms of Adhesion**. A. PIZZI e K. L. Mittal. *Handbook of Adhesive Technology - Second Edition*. s.l. : Marcel Dekker, 2003.

SILVA, A.H.M.F.T. *Dissertação de Mestrado: "Proposta de um Critério de Resistência para Juntas Metálicas Coladas"*. Niterói -RJ : Universidade Federal Fluminense, 2007.

SILVA, A.L.C e Mei, P.R. **"Aços e Ligas Especiais" 2ª Edição pg-457**. Sumaré - SP : Eletrometal S.A Aços Especiais, 1988.

SILVA, Fábio Pinto da . *Tese de Mestrado: "O uso da Digitalização Tridimensional a Laser no desenvolvimento e caracterização de texturas aplicadas ao design de produtos"*. Porto Alegre : Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

SOARES, L. P., et al. **Avaliação Comparativa, por Meio de Rugosimetria Tridimensional, de diferentes Tratamentos Superficiais para Cimentação Adesiva de Compósitos**. Foz do Iguaçu - PR : 17º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2006.

SONG, J. F. e Vorburger, T. V. Metal Handbook " **Surface Texture**". ASM INTERNACIONAL. *Friction, Lubrication and Wear Technology volume 18 pg 630-653*. 1991.

SUAREZ, J.C.M. **"Materiais Metálicos para Indústria Bélica"**. ABM - Associação Brasileira de Metalurgia. 1990, Vol. 46, nº 386.

TAVARES, Héilton R. *Apostila - "Planejamento de Experimentos"*. Belém : Universidade do Pará, 2002.

THOMAS, Tom R. **Rough Surfaces pg 1**. London : Imperial College Press, 1999. ISBN 1-86094-100-1.

TOMITA, Y. **"Development of fracture toughness of ultrahigh strength low alloy steels for aircraft and aerospace applications"**. *Materials Science and Technology*. 1991, Vol. 7, pg 481-489.

WATANABE, Thales M. *Apostila: "Jateamento com Granalhas"*. Joinville - SC : Indústria de Fundição Tupy Ltda., 2008.

WENZEL, R.N. **"Resistance of Solid Surfaces to Wetting by Water"**: Ind. Eng. Chemistry, 1936. 28(8), p.988..

WHITEHOUSE, D. J. **Surface Texture.** *Handbbok of Surface Metrology Volume18 pg 184 - 190*, 1994.

—. 2003. **Surface Characterization.** *Handbook of Surface and Nanometrology*: IOP Publishing Ltd., 2003.

ZAHOUANI, H., Assoul, M. e Vargiolu, R. **The morphological tree transform of surface motifs. Incidence in tribology.** *Internacional Journal of Machine Tools & Manufacture.* 2001, 41.

9. ANEXOS

Relatório de análise química 4007- AMR-L/2010 (Anexo I).....	103
Relatório de análise química 4008- AMR-L/2010 (Anexo II).....	104
Relatório PN-103/10 (Anexo III)	105
Relatório RE PPM N ^o A17-10 (Anexo IV)	147
Relatório RE PPM N ^o A18-10 (Anexo V)	148