

ESTUDO EXPERIMENTAL PARA FURAÇÃO EM AÇO MARAGING 18Ni300 COM APLICAÇÃO AEROESPACIAL

Edmar de Queiroz Figueiredo, edmarqf@gmail.com.br¹

Antônio Jorge Abdalla, abdalla@ieav.cta.br¹

Anderson Vicente Borille, borille@ita.br²

Rafael Borges Mundim, mundim@ita.br²

¹ Instituto de Estudos Avançados – Divisão de Fotônica, São José dos Campos – SP

² Instituto Tecnológico de Aeronáutica - Centro de Competência em Manufatura - São José dos Campos - SP

Resumo: Este trabalho estuda a influência dos parâmetros de furação na usinagem de um aço de ultra alta resistência conhecido como maraging, estes são ligas Fe-Ni-Co-Mo e se diferenciam dos aços ao carbono convencionais por ter um processo de endurecimento principal por precipitação. O Maraging têm vasta aplicação, desde a indústria bélica e nuclear até componentes aeronáuticos, vasos de pressão e indústria esportiva. Os aços maraging são de fundamental interesse nos setores nuclear e aeroespacial em razão de elevada resistência mecânica aliada a uma excelente tenacidade, características altamente desejáveis principalmente para a redução de peso e aumento da segurança. O aço Maraging 18Ni300 têm sido propostos para substituir o aço 300M no veículo lançador de satélites brasileiro (VLS). Neste contexto, torna-se essencial estudar o processo de usinagem por furação, pois o Semi-Fechamento Traseiro e os Anéis de Fixação Dianteiro e Traseiro são partes do envelope motor que são furadas e presas por parafusos. Para avaliar a viabilidade deste processo foram realizados diversos ensaios de furação e em função dos parâmetros de corte e ferramentas utilizadas, foram analisadas as características de acabamento e precisão dimensional para atender os requisitos de projeto.

Palavras-chave: Usinagem, Furação e Aço Maraging 300,

1. INTRODUÇÃO

Diversas tecnologias desenvolvidas para os foguetes da família Sonda tiveram aplicação no projeto do VLS-1, sistemas de separação de estágios, sistemas de controle de altitude e do vetor empuxo, propelente, materiais metálicos e compostos de alto desempenho, entre outros. (PESSOA FILHO; VILLAS BOAS; DAMILANO, 2007).

Em materiais, havia a necessidade da substituição de aços de alta resistência 300M por aços de ultra-alta resistência para atender o requisito de redução de massa estrutural do VLS. Muitos estudos foram e estão sendo feitos sobre o aço Maraging para sua aplicação no setor aeroespacial brasileiro. As características mais importantes deste aço são as elevadas propriedades de resistência associadas à alta tenacidade e ductilidade (FANTON, 2013; REIS, 2015).

O envelope motor é um dos principais componentes do foguete, é uma estrutura que tem dupla função, operar como vaso de pressão e como elemento de viga da estrutura principal do foguete.

O envelope motor é constituído da membrana cilíndrica e dos fechamentos dianteiro e semi-fechamento traseiro. A membrana cilíndrica é formada pela junção de virolas calandradas e soldadas enquanto os fechamentos dianteiro e semi-fechamento traseiro são obtidos a partir de pré-formas embutidas e usinadas onde os anéis de fixação dianteiro e traseiro respectivamente são soldados, Fig. (1). São estes anéis as partes que suportam o acoplamento de componentes intermediários ao propulsor do estágio seguinte através de junção por parafuso, conferindo ao conjunto (VLS) a rigidez e alinhamento necessário dos propulsores para estabilidade em voo.

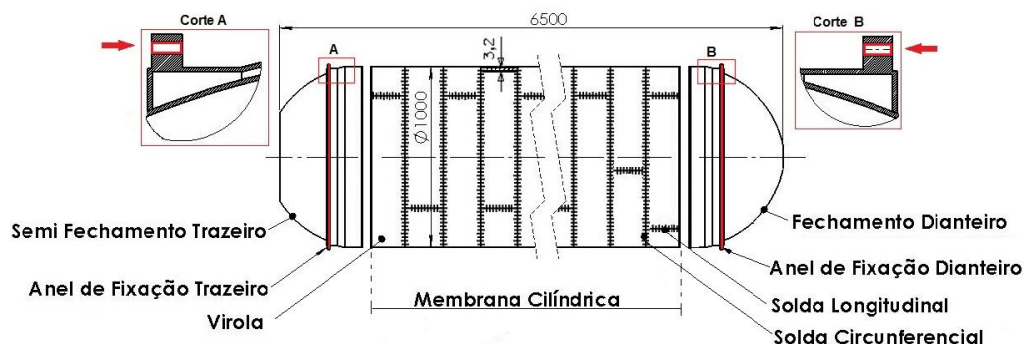


Figura 1. Ilustração esquemática de um envelope motor e seus componentes.

Observa-se que para um Veículo lançador de satélite são usinados um total de 720 furos nos envelopes dos motores S40 e S43, Fig. (2), esses furos são localizados nos anéis de fixação dianteiros e traseiros do envelope motor, a confecção destes furos é a última operação realizada no envelope motor.

Com o propósito avaliar o processo de usinagem por furação em um aço Maraging 18Ni300, para emprego na manufatura de furos dos anéis de fixação dianteiro e traseiro dos envelopes motor S40 e S43, foram realizados ensaios de furação em placas de Maraging 18Ni300 solubilizado e envelhecido, com brocas inteiriças de metal duro com refrigeração interna e diâmetro de 8,2 mm, o mesmo dos furos especificados para anéis de fixação traseiro e dianteiros dos envelopes motor. Verifica-se que os furos são localizados nos anéis de fixação dianteiros e traseiros do envelope motor, conforme Fig. (2), e a confecção destes furos é a última operação realizada no envelope motor.

Será avaliada a integridade superficial e demais parâmetros de corte, para cada combinação de avanço e velocidade de corte. O processo de usinagem pesquisado, buscará a qualidade adequada para a finalidade aeroespacial proposta.

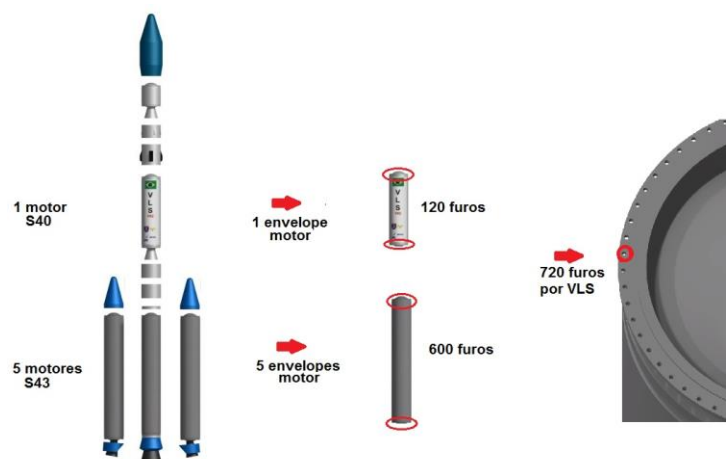


Figura 2. Ilustração quanto ao posicionamento e número dos furos do envelope motor.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para realizar o experimento são apresentados os dispositivos, corpos de provas, ferramentas e a metodologia utilizada para avaliação das brocas e os pares dos parâmetros de corte. Velocidade de corte (V_c) e Avanço (f), cujo desempenho diz respeito à qualidade e integridade superficial do furo gerado. Os Materiais dos corpos de prova foram obtidos a partir de uma chapa aço de aço Maraging 18Ni300 laminado e homogeneizado, e composição química conforme Tab. (1), foram cortados nas dimensões de 203x135x12,85 mm Fig. (3a). Os quatro furos presentes no corpo de prova são para prendê-lo ao dispositivo de fixação, conforme apresentado na Fig. (3a). Foram confeccionadas duas placas do aço Maraging 300, a primeira delas passou pelo tratamento térmico de Homogeneização (1150°C/1h/resfriamento ao ar) e Solubilização (850°C/1h/ resfriamento ao ar), para garantir que o aço estivesse com uma microestrutura homogênea e martensítica, que no caso do aço Maraging é a condição de menor dureza e resistência. A segunda placa passou, além dos tratamentos térmicos de Homogeneização, Solubilização, e pelo Envelhecimento (480°C/3h/refrigeração ao ar), com o aumento das propriedades mecânicas devido à precipitação de intermetálicos.

Tabela 1. Composição química da liga de aço Maraging 18 Ni 300 (REIS, A. G., 2015).

Composição da liga de aço Maraging 300 (%p)															
Elemento	C	S	P	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Co	Al	Ti	Cu	Ca	Zr	Fe
Teor (%p)	0,008	0,002	0,004	0,06	0,01	0,043	19,12	4,94	9,66	0,089	0,77	0,076	0,04	<0,01	Balanco

O dispositivo de apoio e fixação, mostrado na Fig. (3b), foi construído em chapa de alumínio com o formato de placas e dimensões 203x135x4,0 mm, e com furos de 12 mm que serão concêntricos com os furos de 8,2 mm a serem realizados em teste nos corpos de provas. Este dispositivo de apoio é posicionado entre a mesa do dinamômetro e o corpo de prova, os quatro furos de fixação de ambos são concêntricos e através dos quais quatro parafusos M12 prendem o conjunto CDP Maraging e placa de apoio à mesa do dinamômetro. Os corpos de prova foram montados sempre sobre a placa de apoio e ambos fixados na mesa do dinamômetro ou plataforma piezelétrica da Kistler. O conjunto permite avaliar o processo de furação em uma condição semelhante ao processo de fabricação ao atual. Porém com o uso de novas tecnologias de máquina e ferramentas. A configuração deste dispositivo garante a execução de furos passantes, sem que a broca tenha contato com a mesa do dinamômetro, também promove apoio às bordas de

apenas 1,9 mm de balanços, eliminando possíveis deformações das bordas dos corpos de prova durante o processo de furação. As Fig. (3b) e mostram o conjunto em montagem: placa de aço Maraging sobre o suporte de alumínio e Fig. (3c), ambos sobre a mesa dinamométrica, preparados para o ensaio de furação.

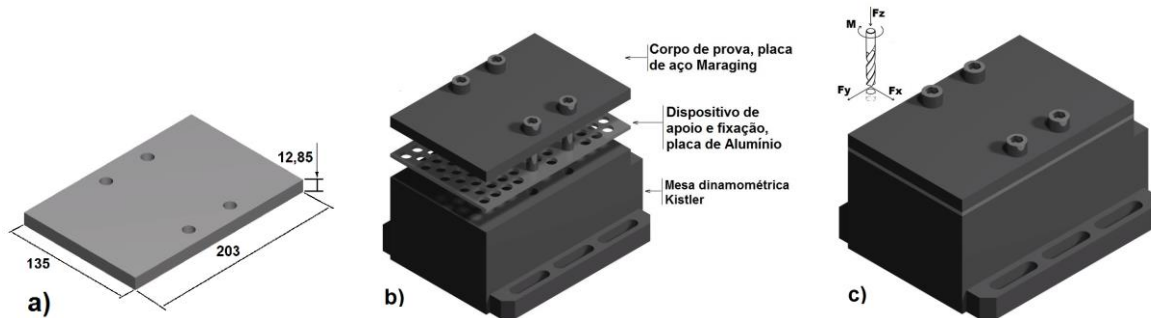


Figura 3. a) Corpo de prova; b) Montagem do dispositivo de apoio e fixação do corpo de prova; c) Corpo de prova montado para início do ensaio.

Foram utilizadas 18 brocas iguais com diâmetro de 8,2 mm da Sandvik Coro Dril 460, atualmente em linha de produção, ou seja são de prateleira. Estas brocas possuem refrigeração interna, são revestidas parcialmente com TiAlN (nitreto de titânio alumínio) e TiN (nitreto de alumínio). São aplicadas em furação de aços extra duros, ou seja endurecidos e temperados. As brocas têm as seguintes especificações: A broca foi selecionada a partir das informações dos catálogos do fabricante, em função das características físico-químicas e propriedades mecânicas de material, foi escolhido o tipo de broca adequado, com código de ferramenta 460.1-0820-025A1-XM GC34. Norma: DIN 6537 K. Tolerância atingível do furo:H9 Áreas de aplicação ISO: H.

A furação com fluido de corte e broca com refrigeração interna atende as recomendações do fabricante da broca Sandvik. Esta condição mantém as temperaturas da broca e corpo de prova em aço Maraging 18Ni300 solubilizado, abaixo das temperatura de 480°C, que é a temperatura suficiente para permitir o envelhecimento da matriz martensítica na superfície do furo do aço solubilizado. E, por conseguinte, também é assegurado para os aços Maraging envelhecido, não atingir a temperatura de 590°, que causaria uma reversão martensítica. O meio lubri-refrigerante utilizado foi QUAKERCOOL 7040 BF que é um fluido semi-sintético de alto desempenho, solúvel em água, formulado com óleo mineral hidratado e aditivos especiais para lubricidade a base de ésteres.

Para a usinagem foi utilizado o Centro de Usinagem Vertical ROMI D 800, localizado no Centro de Competência em Manufatura do ITA (CCM/ITA). As suas principais características são: Comando Siemens D828, Potência Máxima de 15kW, Rotação Máxima de 1200rpm, Curso Máximo em X de 800mm, Curso Máximo em Y de 530mm, Curso Máximo em Z de 580mm.



Figura 4. Configuração utilizada para a Mesa do Dinamométrica na aquisição de força de usinagem (Furação). Adaptado do grupo Kistler (2013).

Para avaliar as características do torque e da força ao longo da usinagem das placas foi utilizada um sistema de aquisição de forças compostos por: a) Mesa dinamométrica Kistler, sensor de forças e momentos modelo 9265B b) Amplificador de sinal Kistler modelo 5070 c) Para a aquisição e tratamento dos dados foi utilizada uma placa de aquisição modelo PCIM-DAS 1602/16 programa da Kistler Dynoware 2825A. O conjunto completo de medição de forças com o dispositivo de fixação e os corpos de prova fixados e ensaiados pode ser visualizado na Fig. (4).

O Planejamento do Experimento usinagem por furação deu-se após a selecionada a broca, seguiu-se a seleção dos parâmetros de corte para a realização dos ensaios. Com base nas recomendações dos fabricantes os ensaios foram

executados com os parâmetros apresentados na Fig (5). Para a consecução dos ensaios, foram realizados nove sequências de dez furos. Os furos tem diâmetro de 8,2 mm e distância entre si de 7,58 mm

Para cada condição foi utilizada uma broca nova e foram realizados dez furos para cada condição. O desenho esquemático destes furos na placa do aço Maraging 300 é mostrado na Fig. (5). Foram realizado a usinagem por furação a partir de uma broca com diâmetro de 8,2 mm realizando furos passantes com 12,85 mm de comprimento nas placas de aço Maraging solubilizado e envelhecidos. Os furos nos corpos de prova foram produzidos variando-se os parâmetros velocidade de corte (V_c) e avanço (f), conforme mostrado na Fig. (5). Foram avaliados conforme as características apresentadas, tais como Rugosidade, Diâmetro, Cilindricidade e Circularidade. Também foram analisadas as forças de usinagem geradas durante a usinagem, desgaste das superfícies cortantes da broca, cavacos e rebarbas. Os ensaios estão baseados na realização das nove sequências de dez furos. Cada sequência de dez furos corresponde respectivamente aos pares dos parâmetros de corte Velocidade de corte (V_c (m/min)) e Avanço (f (mm/revolução)), identificados como A1, B1, C1, A2, B2, C2, A3, B3, C3 conforme Fig. (5).

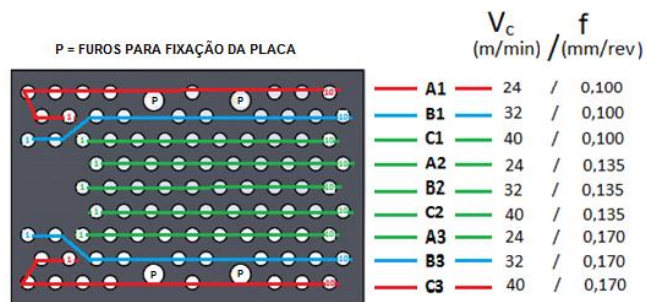


Figura 5. Sequência de furação no Corpo de Prova e os respectivos parâmetros de corte usados.

Apesar de haver um indicativo de realização de maior esforço ao se aumentar o avanço, não houve dificuldade para a realização dos furos, pela robustez da máquina, desempenho da ferramenta de corte e uso de fluídos lubri-refrigerante, seja na placa solubilizada ou envelhecida. Detalhes da qualidade dos furos serão analisados com maior profundidade nos próximos itens. As ferramentas não sofreram desgaste para a realização dos furos.

A análise dos erros de geometria dos furos foram: Erros de forma: diâmetro não uniforme. Erro de posicionamento: deslocamento do centro do furo. Erro de circularidade: seção circular distorcida. Erro de dimensão: diâmetro resultante diferente da broca. Rebarba na entrada e saída do furo. As medições utilizadas, foram realizadas na Máquina de Medição por Coordenadas – MMC do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (CCM/ITA), mostradas na Fig. (6a)

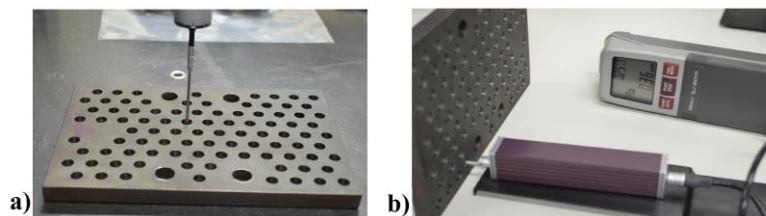


Figura 6. a) Medição de furos do CDP Maraging (CCM/ITA); b) Medição de rugosidade nos furos do CDP Maraging (CCM/ITA)

Na medição de Rugosidade Fig (6b) foram avaliados todos os furos e gerado os gráficos que complementados com os demais ensaios, indicam quais os parâmetros de corte, velocidade de corte e avanço geraram um acabamento superficial mais adequado para a aplicação proposta. O equipamento utilizado para esta finalidade é o Rugosímetro Mitutoyo SJ301 mostrados na Fig. (8b), também pertencente ao CCM/ITA.

Para os ensaios os ensaios metalográficos após a medição de rugosidade, foram selecionados os penúltimos furos relativos aos parâmetros com a maior e menor rugosidade, das placas solubilizadas e envelhecidas para realizar as avaliações do interior dos furos através dos exames estereoscópico, microscopia eletrônico de varredura, ensaio de microdureza e exame metalográfico. Desta forma as placas foram seccionadas, conforme Fig. (7a).

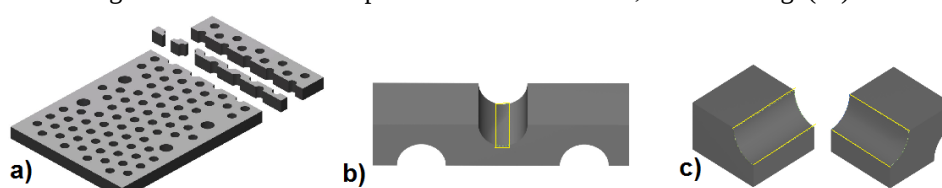


Figura 7. a) Placa seccionada no penúltimo (nono) furo; b) Seção da placa para avaliação estereoscópica; c) Seção da placa para avaliação no MEV

Os exames Estereoscópico, foram realizados nos corpos de prova seccionados com corte de precisão através de equipamento Isomet 1000 do IAE/AMR, verificando-se o interior dos furos como na Fig. (7b). Sendo documentados através de imagens com diferentes aumentos, de dez e vinte vezes.

Para a realização da Microscopia Eletrônica de Varredura, os corpos de prova foram submetidos a mais seccionamentos com cortes de precisão para permitir o acesso à câmara do microscópio de varredura; sendo gerado dois formatos de amostras menores, como mostrado na Fig. (7c) Para análise de algumas regiões das amostras foi realizado EDS (Espectrografia de Dispersão do Raios – X).

Para o Ensaio de Microdureza os corpos de prova Fig. (8) foram embutidos de forma que a secção plana que inicia nas bordas do furo seja a superfície submetida ao ensaio de microdureza. As endentações iniciam a 50 μ m das bordas do furo e se distanciam desta em múltiplos de 50 μ m, mantendo-se próximos das linhas u, v, x, y, z distantes entre si de aproximadamente 200 μ m, conforme Fig. (8) A superfície das amostras embutidas foram polidas e submetidas ao ataque com Nital 3% para revelação da micro estrutura do material. Foi usado o microscópio Zeiss modelo AXIO IMAGER.A2M. As imagens foram realizadas para averiguar as características microestruturais e analisar se houve alteração nas proximidades do furo devido a usinagem.

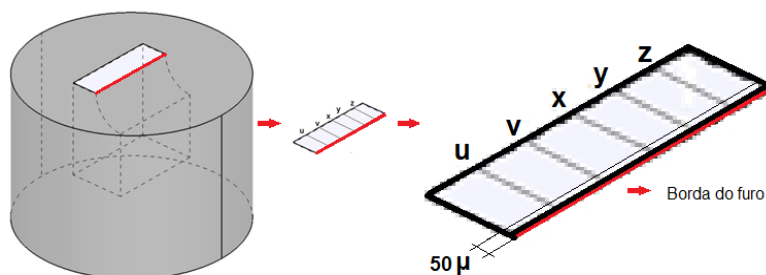


Figura 8. Corpo de prova embutido para Microdureza e microscopia ótica na superfície

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Serão abordadas as principais características do processo em função dos parâmetros de corte, velocidade de corte e avanço, tais como, o mecanismo de desgaste de cada ferramenta, a força de avanço, momento torçor, a formação de cavacos, qualidade dos furos através da análise de rugosidade, diâmetro e desvio de forma. A apresentação dos dados e resultados dar-se-á por meios de gráficos, documentação fotográfica, análises químicas através do sistema EDS (espectroscopia de energia dispersiva) e imagens pelo MEV (microscopia eletrônica de varredura). A imagem da Fig. (9a) mostra a microestrutura do aço Maraging onde é possível observar os contornos dos grãos da martensita após o tratamento térmico de homogeneização a 1150°C durante 1h e resfriamento ao ar, seguido da solubilização a 815°C por 1h e resfriamento ao ar. A Fig (9b) observa-se características típica dos aços Maraging submetida aos tratamentos térmicos de homogeneização, solubilização e envelhecimento a 480°C por 3h e resfriamento ao ar. É revelada uma estrutura martensítica em forma de ripas com elevação da dureza e resistência do aço Maraging envelhecido.

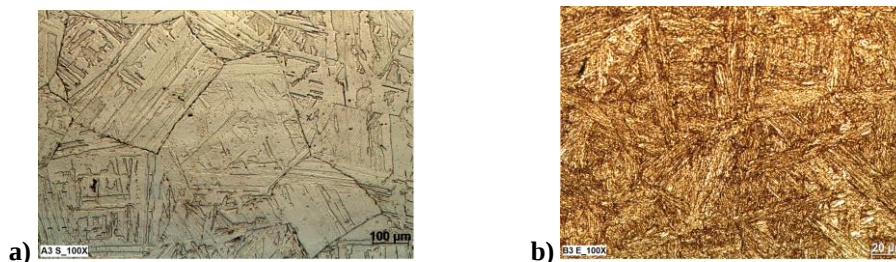


Figura 9. Microestrutura obtida da amostra nas condições: a) solubilizada (100X); b) solubilizada e envelhecida (100X). Ambas superfícies foram polidas e submetida ao Ataque com Nital 3%

Na Rugosidade da placa solubilizada observa-se que para a placa apenas solubilizada, a menor rugosidade ocorre no furo C2, cuja velocidade de corte de 40 m/min e o avanço de 0,135 mm/rev, isto é, maior velocidade de corte e avanço intermediário. Enquanto a maior rugosidade ocorre no furo A3, cuja velocidade de corte de 24 m/min e o avanço de 0,170 mm/rev, ou seja, menor velocidade de corte e maior avanço, conforme mostrado na Tab. (2) e Fig. (10).

Tabela 2. Rugosidades médias da sequência de furos, Ra e Rz em função dos parâmetros de corte para placa solubilizada

Maraging Solubilizado																		
	A1		A2		A3		B1		B2		B3		C1		C2		C3	
Veloc. de corte V_c (m/min)	24		24		24		32		32		32		40		40		40	
Avanço f (mm/revolução)	0,100		0,14		0,170		0,100		0,14		0,170		0,100		0,14		0,170	
Rugosidade R_a e R_z (μm)	R _a	R _z	R _a	R _z	R _a	R _z	R _a	R _z	R _a	R _z	R _a	R _z	R _a	R _z	R _a	R _z	R _a	R _z
Média	0,39	2,39	0,31	1,85	1,12	4,48	0,45	2,54	0,39	2,32	0,34	2,06	0,34	1,99	0,28	1,81	0,37	2,22
Desv. Padrão	0,22	1,35	0,15	0,82	0,89	2,91	0,22	1,11	0,29	1,55	0,28	1,51	0,16	0,97	0,13	0,87	0,22	1,22
Tamanho amostra	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

Nota-se pelo gráfico da Fig. (10) que há uma tendência da rugosidade Rz acompanhar o aumento da rugosidade Ra. Com exceção da condição A3, baixa velocidade (24 m/min) com maior aumento de avanço (0,135 mm/rev.) apresentou a maior rugosidade; as demais condições foram bem semelhantes e se considerarmos o desvio padrão, pode-se afirmar que não há uma diferença significativa da rugosidade, ao se variar as demais velocidades e avanços. A condição C2 apresentou a menor rugosidade.

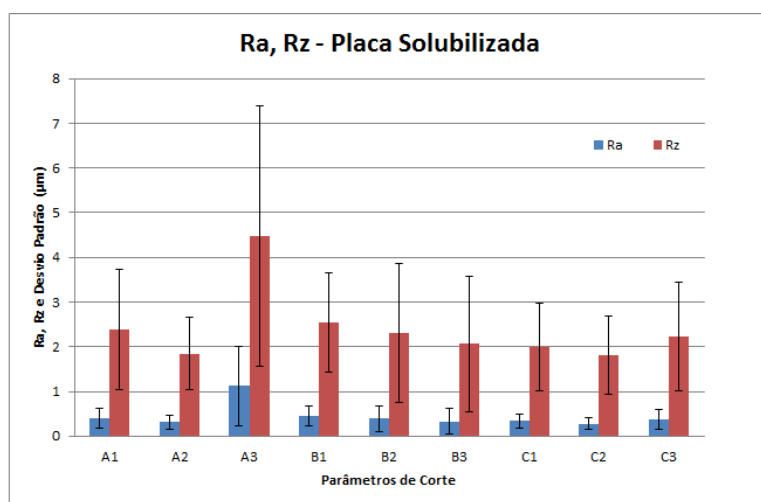


Figura 10. Rugosidades Ra e Rz em função dos parâmetros de corte para placa solubilizada

A avaliação estereoscópica das paredes dos furos produzidos na placa de Maraging solubilizada apresentou marcas em sua superfície, sendo mais acentuadas na região de entrada da broca, e certamente afetando os níveis de rugosidade, e provavelmente devido ao atrito do cavaco com a parede do furo, Fig. (11).

Nota-se que na região de saída da broca as marcas da usinagem são mais uniformes, os riscos paralelos acompanham o valor do avanço.

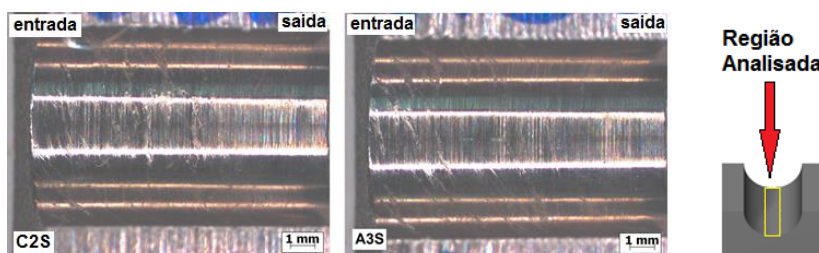


Figura 11. Imagem estereoscópica furos C2S e A3S na placa solubilizada

Na Rugosidade da placa envelhecida verifica-se que a menor rugosidade foi observada no furo B1 E com velocidade de corte 32 m/min e avanço de 0,100 mm/rev, ou seja média velocidade de corte e menor avanço. A maior rugosidade ocorreu no furo B3 E com velocidade de corte média de 32 m/min e avanço máximo de 0,170 mm/rev conforme Tab. (3), Fig. (12).

Tabela 3. Rugosidades média de furos, Ra e Rz em função dos parâmetros de corte para placa envelhecida

Maraging Envelhecido																		
	A1		A2		A3		B1		B2		B3		C1		C2		C3	
Veloc. de corte Vc (m/min)	24		24		24		32		32		32		40		40		40	
Avanço f (mm/revolução)	0,100		0,14		0,170		0,100		0,14		0,170		0,100		0,14		0,170	
Rugosidade Ra e Rz (µm)	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
Média	0,21	1,41	0,35	1,89	0,32	1,92	0,16	1,11	0,40	2,18	0,50	2,55	0,31	1,82	0,47	2,10	0,41	2,13
Desv. Padrão	0,07	0,46	0,17	0,72	0,1	0,64	0,04	0,30	0,14	0,35	0,18	0,84	0,10	0,58	0,47	1,41	0,25	0,90
Tamanho amostra	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

Para os furos realizados na placa envelhecida, onde a dureza é maior, o menor avanço parece ser o mais indicado para se obter uma menor rugosidade na superfície usinada, os menores valores de rugosidade ocorrem para o avanço de 0,100 m/min. Apesar desta tendência deve-se considerar que o desvio padrão não permite afirmar que há uma diferença significativa entre as condições. Acredita-se que o fenômeno de aumento da rugosidade associado à elevação no valor do avanço ocorra devido aos maiores esforços necessários para perfurar a estrutura envelhecida, pois esta tem um aumento de dureza significativa após o tratamento de envelhecimento. Observa-se que os furos das placas do aço Maraging envelhecido apresentam uma superfície com características mais uniforme e com melhor acabamento o que reflete em menores valores de Ra e Rz, conforme observado nas Fig. (12) e Fig. (13)

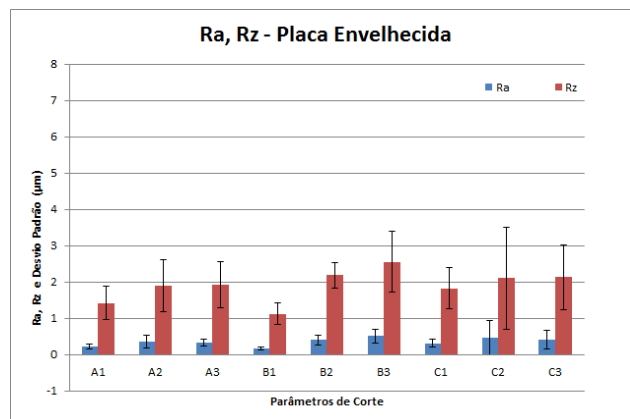


Figura 12. Rugosidades Ra e Rz em função dos parâmetros de corte para placa envelhecida.

Os furos das placas do aço Maraging envelhecido apresentam uma superfície com características mais uniforme e com melhor acabamento o que reflete em menores valores de Ra e Rz, conforme observado nas Fig. (16) e Fig. (17).

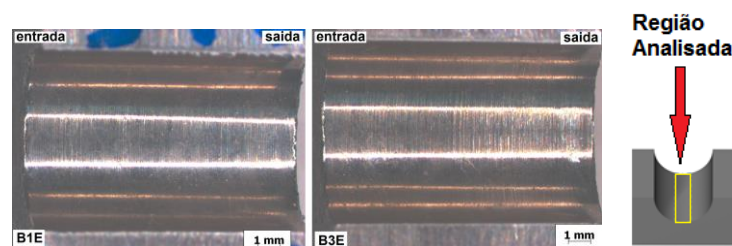


Figura 13. Imagem estereoscópica furos (B1 E) e (B3 E) na placa envelhecida

As características dimensionais dos furos, para as placas Solubilizadas e Envelhecidas foram avaliadas através do Diâmetro, Cilindricidade e Circularidade. Os furos C2 S e A3 S da placa solubilizada e envelhecida que apresentaram os menores e maiores valores de Rugosidades Ra e Rz são comparados na Fig. (14a). e Fig. (14b) Nota-se que os valores dos diâmetros são muito semelhantes e o valor do desvio padrão é muito superior à diferença das médias.

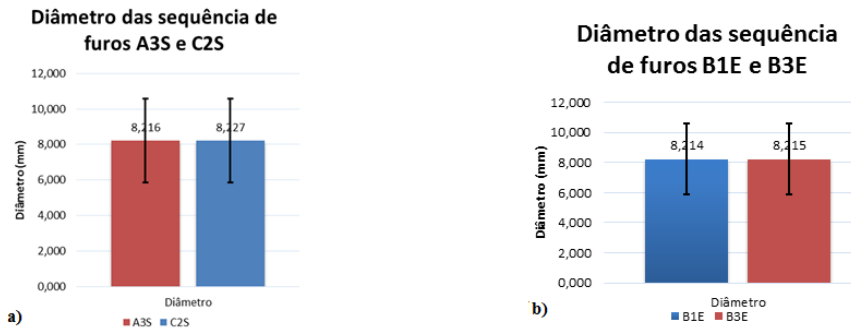


Figura 14. Diâmetros médios para os furos a) A3 S, C2 S, solubilizados e b) B1 E, B3 E envelhecidos

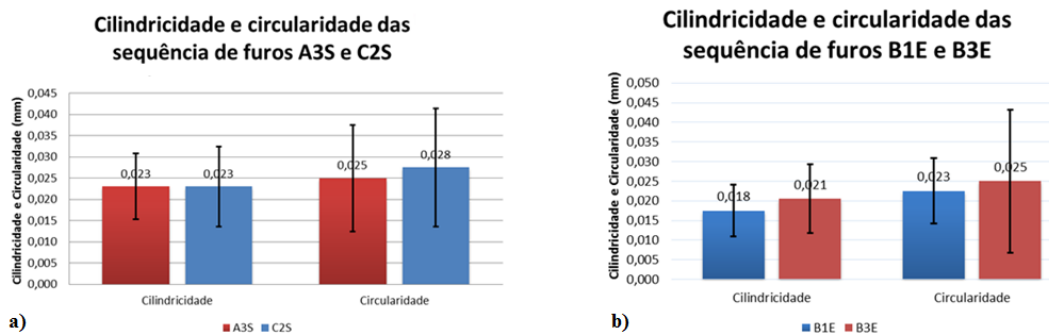


Figura 15. Médias e Desvio Padrão da Cilindricidade e Circularidade, para os furos usinados que apresentaram menor rugosidade no aço Maraging a) solubilizados e b) envelhecido.

A cilindridade e circularidade, nos furos que apresentaram menores valores de rugosidade apresentaram também menor valor médio nestes fatores de forma, conforme mostrado na Fig. (15a) e Fig. (15b). Estes valores são também inferiores aos valores apresentados para os furos na chapa apenas solubilizadas, nas melhores condições de rugosidade. Este resultado reforça a indicação de que os furos realizados após o envelhecimento tendem a apresentar melhor qualidade de acabamento. Gostaríamos, por outro lado, de lembrar também que apesar destas diferenças na média dos valores, estes são de pequena magnitude e, os desvios padrões, destas diferenças tornam-as pouco significativas

As forças de corte exercidas pelas brocas sobre nas placas de aço Maraging 300, nas direções x, y e z. são de grande importância na manutenção da integridade da superfície gerada durante a furação, os esforços desenvolvidos sobre a placa solubilizada estão na Tab. (5). As forças no sentido z, são de maior intensidade, como se espera, por ser a

Tabela 5. Forças desenvolvidas durante a furação para atender os parâmetros de velocidade de corte e avanço para: a) chapa de aço Maraging Solubilizada e b) chapa de aço Maraging Envelhecida.

a)	Fz (máx)	Fy (máx)	Fx (máx)
A1S	1.818,00	91,58	88,14
A2S	2.010,00	56,47	60,89
A3S	2.174,00	56,17	60,38
B1S	2.953,50	64,52	70,04
B2S	1.833,00	57,68	68,30
B3S	2.057,00	75,16	55,02
C1S	2.765,50	56,99	47,20
C2S	1.897,00	62,75	52,96
C3S	2.009,50	79,56	78,65

b)	Fz (máx)	Fy (máx)	Fx (máx)
A1E	2.872,00	98,28	83,59
A2E	2.899,00	98,26	83,59
A3E	3.556,50	89,45	103,90
B1E	2.976,00	83,04	86,43
B2E	3.081,00	113,80	95,94
B3E	3.263,00	90,73	99,14
C1E	2.765,50	118,10	94,76
C2E	3.083,00	93,94	97,53
C3E	3.420,50	147,50	114,05

direção de avanço, as forças nas direções x e y são semelhantes e de menor intensidade. Destacam-se na Tab. (5) as forças desenvolvidas para os furos onde se observou os menores C2 S e o maiores A3 S valores de rugosidade. Os ensaios de dureza por microindentação Vickers, foram realizados nas proximidades, na borda do furo realizado. A intenção foi avaliar se ocorreu aquecimento e, por conseguinte transformação de fases. No aço apenas solubilizado, caso houvesse um aquecimento suficiente, a certa distância do furo apareceria uma região de envelhecimento, com durezas acima de 400 HV, nota-se que, para esta condição, a dureza manteve-se na média esperada entre 330 e 350 HV Fig. (16), C2 S e A3 S. Para a condição envelhecida, devido a precipitação de intermetálicos, há uma elevação considerável de dureza, entre 580 e 620 HV para os furos B1 E e B3 E, Fig. (16), neste caso com tratamento térmico de envelhecimento, se a temperatura tivesse ultrapassado a faixa de transformação austenítica, haveria a formação de nova martensita no resfriamento e teríamos uma região de menor dureza nas proximidades do furo. Este valor seria inferior a 400 HV, fato também não observado nestas medidas. Para ambas as condições microestruturais do aço não houve

alteração nos valores de dureza concluímos, portanto, que o processo de lubrificação e refrigeração foi bastante eficiente, pois evitou o aquecimento a temperaturas que pudessem levar ao envelhecimento.

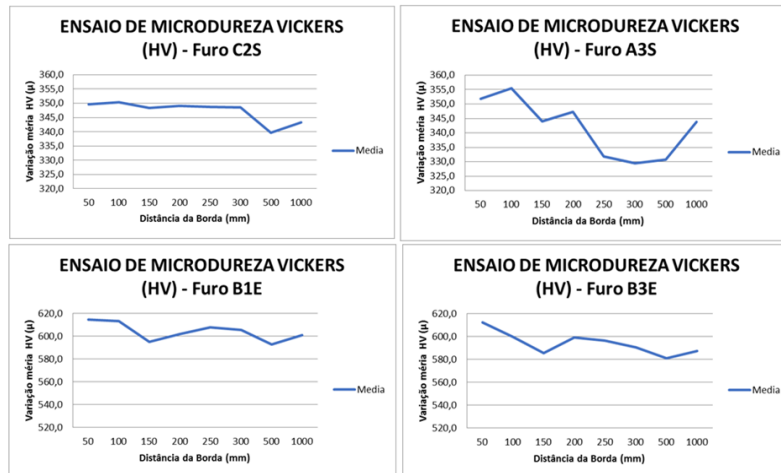


Figura 16. Dureza por microindentação para as condições de furação críticas – menor e maior rugosidade.

Foram realizadas as análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) em diversas amostras dos furos. Imagem dos furos na condição solubilizada para os furos, C2 S, com menor rugosidade e A3 S com maior rugosidade. Nota-se que na região de entrada da broca há marcas mais acentuadas indicando o esforço maior para a entrada da broca e há algumas partículas aderidas e deformadas próximo a superfície, na região média há alguns indícios de material aderido e próximo a saída percebe-se as linhas devido ao avanço e ruptura brusca na saída da ferramenta.

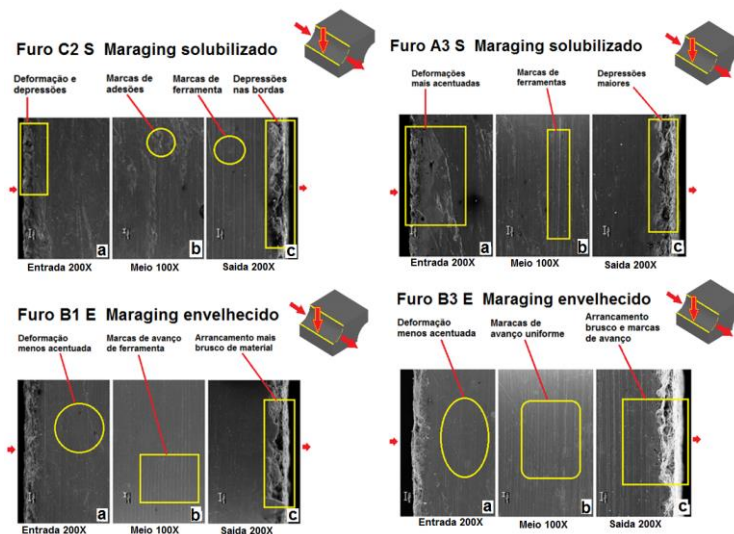


Figura 17. MEV: Região interna de usinagem na furação: a) entrada da broca, b) região média, c) saída da broca. Na condição solubilizada para os furos C2 S e A3 S. Na condição envelhecida para os furos B1 E e B3 E.

As imagens da Fig. (17), para o furo na condição A3 S, no estado solubilizada, com maior rugosidade, os fenômenos são semelhantes ao observado na condição C2 S, porém com deformações mais acentuadas na entrada da ferramenta e arrancamentos mais agressivos na saída da ferramenta. Este fato se justifica pelo maior avanço que a condição anterior. A Fig. (17) mostra a superfície interna para o aço na condição envelhecida dos furos B1 E com menor rugosidade e B3 E, com maior rugosidade, observa-se neste caso a deformação na entrada da ferramenta semelhante ao anterior. Devido a alta dureza do material, nota-se as marcas devido ao avanço da ferramenta, o arrancamentos de material de forma brusca na saída da ferramenta e sulcos um pouco mais profundos e acentuados.

5. CONCLUSÕES

A usinagem por furação do aço Maraging 18 Ni300 tanto na condição solubilizada como envelhecida com utilização da broca da Sandvik com refrigeração interna modelo 460.1-0820-0251-XM GC34, mostrou-se eficaz, desde que se utilize um líquido refrigerante/lubrificante. A microestrutura do aço Maraging solubilizado, com menor dureza (350 HV) exigiu menores forças de corte durante o processo de furação. O aço envelhecido, devido à elevação na

dureza e resistência, exigiu forças de corte com cerca de 50% superior (aproximadamente 3.000 N). Analisando as características dimensionais, o diâmetro, a cilindridade e a circularidade, nota-se que os valores médios para o aço envelhecido têm um acabamento de melhor qualidade, porém, ao considerar-se o desvio padrão essa diferença torna-se desprezível. Comparando a rugosidade na superfície usinada do aço Maraging solubilizado e envelhecido, observa-se uma rugosidade um pouco menor no aço envelhecido, porém nota-se que o desvio padrão é elevado, tornando esta diferença pouco significativa. A rugosidade na região de entrada da broca (região de saída dos cavacos) mostrou-se mais elevada, principalmente no aço solubilizado. Este efeito está associado ao estado martensítico do material do cavaco, mais dúctil, que adere próximo à superfície de saída. Após o envelhecimento do Aço Maraging, os cavacos tornam-se mais frágeis e reduzem este fenômeno. Este aço tem um grande potencial para aplicações industriais, para fins estruturais. No caso específico deste estudo pretende-se utilizá-lo no envelope motor dos propulsores do VLS. Na produção do envelope motor os furos da cinta de fixação fazem parte da última operação de fabricação e nesta etapa o aço Maraging já está envelhecido. Este estudo mostrou que além de ser viável a furação do aço Maraging envelhecido é também desejável, pois o acabamento torna-se de melhor qualidade.

6. AGRADECIMENTOS

Ao IEAv, IAE e ITA/CCM como instituições que proporcionam um ambiente de formação pessoal e profissional aos seus pesquisadores

À empresa Sandvik Coromant pelo apoio técnico e material neste experimento.

7. REFERÊNCIAS

FANTON, L. **Estudo do comportamento mecânico e microestrutural de um aço Maraging após soldagem a laser e tratamentos térmicos**. 2013. 89 f. Dissertação Mestrado em Engenharia Mecânica na área de Materiais-Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá,

FIGUEIREDO, Edmar de Queiroz. **Análise da usinagem por furação em um aço Maraging homogeneizado e envelhecido**. 2015. 123f. Dissertação mestrado em Ciências e Tecnologias Espaciais na área de Física e Matemática Aplicada – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. **Manufacturing engineering and technology**. 6. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010. 1176 p.

MACHADO, Á. R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011.

PESSOA FILHO, J.B.; VILLAS BOAS, D.J.F.; DAMILANO, J.G. **Veículos espaciais**. Brasília: Agencia Espacial Brasileira, 2007.

REIS, A.G. **Estudo do comportamento mecânico do aço Maraging 300 solubilizado, envelhecido e nitretado por plasma**. 2015. 115 f. Tese (Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica na área de Materiais e Processos de Fabricação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos. 2015

SANDVIK COROMANT. **Ferramentas rotativas**. Suécia: Sandviken, 2011., Suécia. Disponível em: http://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/catalogues/pt-pt/rotating/rot_j.pdf, Acesso em: 10 jun. 2015.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

EXPERIMENTAL STUDY FOR MARAGING 18Ni300 STEEL HOLE WITH AEROSPACE APPLICATION

Abstract: *This work studies the influence of drilling parameters on the machining of an ultra high strength steel known as maraging, these are Fe-Ni-Co-Mo alloys and differ from conventional carbon steels by having a main hardening process by precipitation. The Maraging have wide application, from the military and nuclear industry to aeronautical components, pressure vessels and sports industry. Maraging steels are of fundamental interest in the nuclear and aerospace sectors due to their high mechanical resistance combined with excellent toughness, which are highly desirable characteristics mainly for weight reduction and safety enhancement. Maraging 18Ni300 steels have been proposed to replace the 300M steel in the Brazilian satellite launch vehicle (VLS). In this context, it is essential to study the machining process by drilling, since the Semi-Closing Rear and the Front and Rear Clamping Rings are parts of the motor envelope that are drilled and fastened by bolts. In order to evaluate the feasibility of this process, several drilling tests were performed and, depending on the cutting parameters and tools used, the finishing characteristics and dimensional accuracy were analyzed to meet the design requirements.*

Keywords: *Machining, Drilling and Steel Maraging 300*