



INTERFERÊNCIA DOS PROCESSOS DE MANUTENÇÃO DA FACE DE UM CABEÇOTE DE MOTOR AUTOMOTIVO EM SUA QUALIDADE SUPERFICIAL

MAINTENANCE PROCESS INTERFERENCE OF THE CYLINDER HEAD FACE OF THE AUTOMOTIVE ENGINE ON ITS SURFACE QUALITY

L. BENINI^{1,*}, G. C. R. ROSSI¹, e C. L. da SILVA¹

¹Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica, Viçosa, Minas Gerais, Brasil

* Autor correspondente. Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica, Viçosa, Minas Gerais, Brasil, Phone: +55 31 3612 6500

Endereço de e-mail: lucasbenini@gmail.com (L. Benini).

ARTICLE INFO

Article history:

Received 2019-07-20

Accepted 2019-08-20

Available online 2019-08-20

palavras-chave

Cabeçote de motor

Aplainamento

Soldagem TIG

Rugosidade

keywords

Cylinder head

Planning machining

TIG welding

Roughness

RESUMO

Cabeçotes de motores de combustão interna são um dos componentes sob maiores condições de desgaste do sistema de geração de força dos veículos automotores. Com isso, torna-se pertinente o estudo das técnicas utilizadas para a recuperação das dimensões adequadas para o seu perfeito funcionamento. Este trabalho visa analisar a qualidade da superfície gerada na face inferior de um cabeçote de liga de alumínio, após os processos de preenchimento por operações de soldagem em regiões que sofreram desgaste e subsequente processo de usinagem de aplainamento. Foram realizadas medições de rugosidade, de dureza e de metalografia nas regiões não preenchidas e preenchidas pelo processo de soldagem TIG e posteriormente aplainadas. Verificou-se que a presença de metal de adição não afeta o acabamento da superfície usinada e que as regiões que receberam preenchimento apresentaram maior ductilidade e defeitos de porosidade. Com isso, o componente pode se tornar mais suscetível a desgastes nas regiões com preenchimento.

ABSTRACT

Cylinder head of internal combustion engines are one of the most under-worn components of the automotive power generation system. Thus, it becomes pertinent to study the techniques used for the recovery of the appropriate dimensions for their perfect functioning. This work aims to analyze the surface quality generated on the underside of an aluminum alloy head, after filling processes by welding operations in regions that have suffered wear and subsequent planning machining process. Roughness, hardness and metallography measurements were performed in the unfilled and filled regions by the TIG welding process and subsequently flattened. The presence of filler metal did not affect the finish of the machined surface and the regions that received filler presented higher ductility and porosity defects. This context makes the component more susceptible to wear in the filled regions.

1. INTRODUÇÃO

O crescente desenvolvimento dos veículos automotores nas últimas décadas aumentou também, em linhas gerais, a dependência das pessoas em relação a estes. Isso pois, atualmente, uma parte expressiva da população mundial utiliza de veículos sobre rodas ao se locomover para realizar suas atividades cotidianas e para transportar muito do que é produzido e consumido pela sociedade em geral. Para evidenciar este fato citam-se exemplos como nos grandes centros urbanos, onde se vê em abundância veículos como motocicletas, automóveis, ônibus, caminhões, dentre outros. No que se refere às características de funcionamento dessas máquinas, é de conhecimento comum que a maioria tem como componente básico um motor de combustão interna. No âmbito da engenharia, observa-se que os estudos e pesquisas acerca do projeto, funcionamento e manutenção dos motores automotivos, recebem cada vez mais esforços de colaboradores de variadas especialidades. Tal importância é dada ao assunto pois o conhecimento a respeito desta máquina em si é capaz de gerar soluções para seus problemas de funcionamento, como por exemplo os problemas de desgaste, que geralmente se fazem presente em veículos com alguns anos de uso regular.

Um dos componentes do motor de combustão interna que mais sofre desgaste é o cabeçote. Por conter todas as partes superiores das câmaras de combustão, este componente sofre constantemente com perturbações térmicas e mecânicas. Por isso, chega-se a observar em um cabeçote danificado, defeitos como trincas, crateras, corrosão e até empenamento de todo o componente. As partes danificadas de um motor, como o cabeçote, são usualmente enviadas para reparo em empresas conhecidas popularmente como "retificas" ou "retificadoras". Nestes locais, utilizam-se principalmente de processos de usinagem por corte, processos abrasivos e procedimentos de soldagem para se recuperar a forma e, conseqüentemente, o funcionamento adequado das partes em manutenção.

Após passar pelos processos de manutenção apresentados, o cabeçote do motor será posto novamente em funcionamento, onde normalmente estará submetido aos mesmos fatores de desgaste que ocasionaram os problemas reparados. Além disso, é desejável que o cabeçote recuperado tenha as mesmas características de desempenho que possuía antes de apresentar defeitos. Por isso, a investigação dos efeitos gerados por esses processos de recuperação é extremamente relevante para basear discussões a respeito de tais técnicas de manutenção corretiva.

Este trabalho tem por objetivo principal verificar e comparar os efeitos do processo de soldagem utilizado como mecanismo para o preenchimento de material no cabeçote e do processo usinagem de aplainamento na qualidade superficial da face inferior de um cabeçote de motor a combustão construído em liga de alumínio. Os objetivos específicos são:

- Comparar o acabamento superficial, por meio de ensaios de rugosidade, entre as regiões usinadas pelo processo de aplainamento que receberam preenchimento por processo de soldagem e as regiões que foram apenas usinadas;
- Realizar ensaios de metalografia para comparar a

microestrutura das duas regiões de interesse descritas, averiguar a presença de defeitos de soldagem e avaliar a compatibilidade do metal de adição utilizado em relação ao metal base;

- Realizar ensaios de dureza para comparar a dureza superficial das duas regiões descritas.

2. CABEÇOTES DE MOTORES AUTOMOTIVOS

De acordo com Brunetti (2012), o projeto do cabeçote é, sem dúvida, a etapa mais importante na criação de um novo motor. Isso pois, este componente e seus dutos, conjugados ao formato de câmara de combustão, determinam se o motor terá bons ou maus resultados de desempenho, além de tornar a manufaturabilidade mais simples ou complexa, repercutindo no custo do motor e atendimento aos objetivos iniciais do projeto. O cabeçote tem a função de cobrir os cilindros, formando a câmara de combustão na parte superior do bloco do motor. Nele, ocorrem altas pressões por conta do pistão que comprime a mistura, no caso do ciclo Otto, ou o ar, no caso dos motores de ciclo Diesel (Tilmann, 2013).

O cabeçote ainda apresenta na sua parte inferior parte da câmara de combustão, orifícios para o alojamento das válvulas, bicos injetores, canais para a água de arrefecimento (motores arrefecidos à água) ou aletas (motores arrefecidos à ar), canais de admissão, escape e para óleo lubrificante (Furlan e Silva, 2006). Na Figura 1 é apresentado um cabeçote de motor automotivo.



Figura 1 - Cabeçote de motor automotivo fabricado de liga de alumínio.

As ligas comumente empregadas na construção de cabeçotes de motores de combustão interna são: alumínio-silício, alumínio silício magnésio, cobre silício magnésio e alumínio cobre (Cunha, 2012). Os percentuais de elementos de liga que normalmente são encontrados na composição dos cabeçotes estão expostos na Tabela 1.

2.1 Processo de usinagem da face do cabeçote

De acordo com Ferraresi (1977), entende-se como operações de usinagem aquelas que produzem cavaco ao conferir forma, as dimensões ou acabamento, ou ainda uma combinação destes três itens. O Cavaco pode ser definido como a porção de material retirada da peça pela ferramenta, que por característica apresenta forma geométrica irregular.

Tabela 1 - Composição química das ligas empregadas em cabeçotes de motores (Cunha, 2012).

Elementos Químicos	%
Si	8,00 – 9,50
Cu	4,30 – 5,00
Mn	0,30 – 0,50
Mg	0,50 – 0,70
Ti	0,10 – 0,20
Sr	0,012 – 0,02
Fe	0,75 Máx
Ni	0,30 Máx
Zn	0,70 Máx
Ca	0,003 Máx
Total de outros elementos	0,50 Máx

Os processos de usinagem mais empregados são: torneamento, fresamento, furação, aplainamento, mandrilamento, serramento, brochamento, roscamento e retificação (Machado *et al.*, 2009). Este trabalho se constrói a partir de uma operação considerada de aplainamento pela indústria, portanto ela será abordada de forma mais detalhada. Por outro lado, o processo de Usinagem do cabeçote possui semelhanças com o processo de fresamento, portanto este também será abordado.

Ferraresi (1977) define o processo de aplainamento como processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de superfícies regradas, geradas por um movimento retilíneo alternativo da peça ou ferramenta. Quanto à finalidade, as operações de aplainamento podem ser classificadas ainda em aplainamento de desbaste e aplainamento de acabamento. Já o processo de fresamento é definido como um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies quaisquer com o auxílio de ferramentas geralmente multicortantes. Para isso, a ferramenta necessariamente deve girar e a peça ou a ferramenta se deslocam por uma trajetória qualquer. A operação de fresamento é reconhecida por ser versátil, proporcionando a produção de superfícies diversas, além disso garante elevadas taxas de remoção de material, já que a ferramenta (fresa) possui múltiplas arestas de corte (Machado *et al.*, 2009). Ferraresi (1977) caracteriza o fresamento frontal como um processo que gera uma superfície plana de orientação perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta de corte. Na Figura 2 podem ser observados os principais tipos de operações de fresamento.

O processo de usinagem da face do cabeçote para corrigir desvios de planicidade muito se assemelha à definição do processo de fresamento frontal. Isso pois em tal processo o corte é realizado por um movimento giratório do disco porta ferramenta, contendo um incerto de corte, enquanto a peça se desloca de forma linear. No ambiente industrial, tal processo recebe o nome de aplainamento de cabeçotes. Isso se deve principalmente ao fato deste processo de usinagem ter a mesma finalidade da maioria dos procedimentos de aplainamento convencionais, ou seja, corrigir desvios de planicidade. Este tipo de deformação é popularmente conhecido como empenamento do cabeçote. Além disso, as máquinas que realizam este tipo de usinagem nos cabeçotes são comercializadas como “plainas de cabeçote”. Apesar de haver semelhanças do processo de usinagem aqui descrito com o processo de fresamento, a caracterização como fresamento frontal vai de encontro com algumas definições.

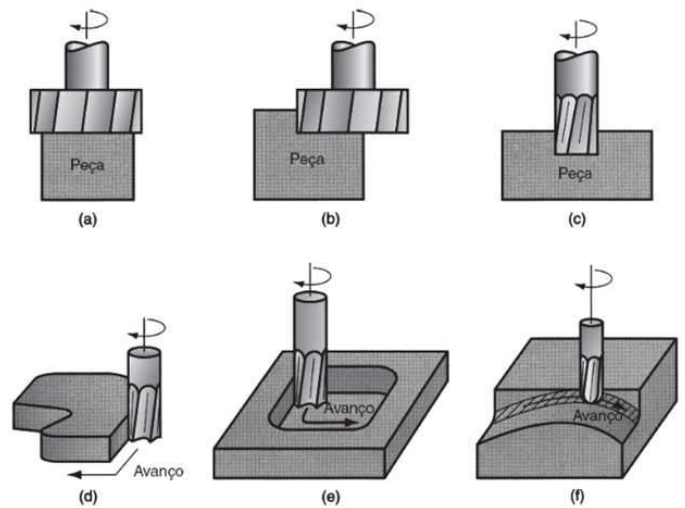


Figura 2 - Fresamento frontal (a) feccamento convencional; (b) faceamento parcial; (c) fresamento de topo; (d) fresamento de borda; (e) fresamento de cavidade (f) fresamento de superfícies curvas (Grover, 2017).

Isso ocorre pois, diferentemente do que foi citado por Machado (2009), o processo de usinagem da face do cabeçote é realizado por uma ferramenta monocortante. Consequentemente, a taxa de geração de cavaco é baixa, já que a ferramenta possui apenas um único gume, que entra em contato com a superfície de corte apenas durante parte de cada ciclo. A rigor, o processo aqui explorado também não pode ser chamado de aplainamento, pois a ferramenta realiza movimento rotativo em torno do eixo do disco da máquina, e não um movimento linear alternativo como descrito por Ferraresi (1977). Entretanto, observa-se que no ambiente industrial o processo é corriqueiramente assim definido, inclusive as máquinas ferramentas para realização deste tipo de usinagem são descritas pelos fabricantes como plainas para usinar cabeçotes e blocos. Sendo assim, neste trabalho, o processo de usinagem da face inferior do cabeçote de motores automotivos será chamado de aplainamento, sempre considerando as ressalvas aqui já explicitadas. Na Figura 3 está ilustrada a máquina denominada “plaina de cabeçotes”.



Figura 3 - Plaina de cabeçotes (HK Máquinas, 2019).

2.2 Processos de soldagem

Segundo Machado (1996), a soldagem constitui o grupo de processos dentre os de união que é empregado em um grande volume de atividades. A união dos metais ocorre através da fusão de ambos em íntimo contato ou pela fusão de ambos e adição de outro material fundido, ou ainda, simplesmente por contato destes materiais.

Os processos de soldagem se diferem principalmente pela fonte de energia para fusão dos materiais, pela forma de proteção da região da solda durante o processo, dentre outros. O processo de interesse para este trabalho é o processo TIG, que pertence ao grupo dos processos de soldagem a arco elétrico. Machado (1996) define o processo de soldagem *Tungsten Inert Gas* (TIG) pelo qual um eletrodo não consumível de tungstênio puro – ou composto com outros metais, ou óxidos – gera um arco elétrico com a peça, que juntamente com a poça de fusão assim formada, é protegido da atmosfera por um gás inerte (geralmente argônio). O processo de soldagem TIG pode ser realizado com apenas a fusão dos metais base envolvidos (Figura 4) ou com a adição de metal através de varetas específicas para esse fim.

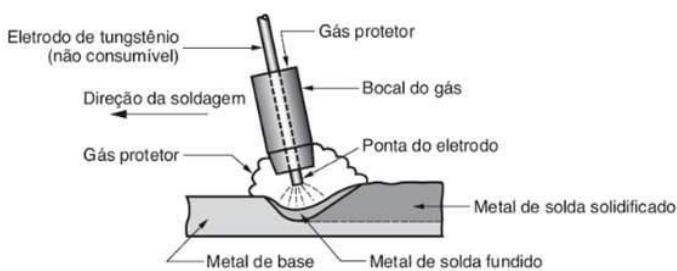


Figura 4: Processo de soldagem TIG (Groover, 2017).

O processo de soldagem TIG é amplamente utilizado em ligas de alumínio devido a uma série de razões: excelente proteção à contaminação; mínima distorção, já que a temperatura aumenta apenas em uma região muito pequena; taxa de resfriamento relativamente alta, o que permite soldar ligas com grandes intervalos de solidificação. Além disso, o jato de gás inerte focado na região de solda expulsa eventuais óxidos da poça de fusão. Por outro lado, a alta taxa de solidificação pode resultar em porosidade, devido ao pouco tempo disponível para o escape de gases proveniente de umidade, graxas, etc. Para se evitar esse problema deve-se atentar à limpeza das partes a serem soldadas e à pureza do gás de proteção (Machado, 1996).

Marques *et al.* (2009) citam os possíveis defeitos derivados dos processos de soldagem e os classifica como “descontinuidades”. Os diferentes tipos de descontinuidades podem ser divididos em 3 grupos: descontinuidades dimensionais, descontinuidades estruturais e propriedades inadequadas. As descontinuidades dimensionais “são alterações de forma e dimensões que componentes soldados sofrem como resultado de deformações plásticas derivadas do aquecimento não uniforme e localizado durante a soldagem”.

Os principais tipos de descontinuidades dimensionais são: distorções, dimensões incorretas da solda e perfil incorreto da solda. As descontinuidades estruturais são “descontinuidades na micro ou macroestrutura na região da solda, associadas à falta de material ou à presença de material estranho em quantidades apreciáveis. Sua gravidade depende do tipo de descontinuidade, sua extensão e geometria”. Os principais tipos de descontinuidades estruturais são: porosidades, inclusões de tungstênio, falta de fusão, falta de penetração, mordedura, trincas, dentre outras. As propriedades inadequadas são um tipo de descontinuidade que ocorre quando a solda não apresenta as características químicas ou físicas esperadas.

2.3 Análise de rugosidade aplicada à face inferior do

cabeçote de motor automotivo

A rugosidade de uma superfície é composta de irregularidades finais ou de erros micro geométricos resultantes da ação relacionada ao processo de corte (marcas de avanço, aresta postiça de corte, desgaste da ferramenta etc.) (Machado *et al.*, 2009). De acordo com Bet (1999), os parâmetros verticais de rugosidade fornecem informações a respeito da ordem de grandeza das ordenadas do perfil (alturas). Os parâmetros R_a , R_q , R_t (ou R_y), R_z e $R_{máx}$ são os mais comuns de serem analisados e utilizados como parâmetros de controle de qualidade. A Tabela 2 apresenta a definição destes parâmetros.

Tabela 2 - Parâmetros verticais de rugosidade (Bet, 1999).

Símbolo	Nome	Definição
R_a	Desvio aritmético médio	Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem
R_q	Desvio médio quadrático	Raiz quadrada da média dos valores quadrados das ordenadas no comprimento de amostragem
R_t (ou R_y)	Altura total do perfil	Soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade de vale do perfil no comprimento de avaliação
R_z	Altura máxima do perfil	Soma da altura máxima dos picos e da maior profundidade dos vales no comprimento de amostragem
$R_{máx}$	Distância máxima Pico a vale	Maior distância pico-a-vale dentro dos 5 comprimentos de medição

A face inferior do cabeçote pode ser caracterizada como uma superfície de apoio e com carregamento dinâmico, devido à presença de impactos, vibrações e tensões térmicas variáveis, durante o funcionamento do motor. Também é requerido da face do cabeçote que seja uma superfície de vedação, pois ao se juntar ao bloco do motor através da junta de vedação, não deve permitir o vazamento de água de arrefecimento ou de óleo lubrificante. Isso pois esse tipo de vazamento poderia causar danos à junta, à câmara de combustão ou a outros componentes do motor.

Segundo Bet (1999), os parâmetros R_a e R_q são os parâmetros mais utilizados no controle de qualidade de processos de fabricação. Entretanto, esses parâmetros em si não são suficientes para caracterizar a superfície técnica analisada neste trabalho, pois não são capazes de evidenciar a presença de picos e vales acentuados. O parâmetro R_z é mais adequado para a avaliação de superfícies de apoio, pois considera a média das maiores distâncias pico-a-vale dos 5 comprimentos de amostragem e por outro lado não sofre tanta influência de grandes picos ou vales isolados. Já os parâmetros $R_{máx}$ e R_y , são adequados para avaliação de superfícies de vedação e/ou carregadas dinamicamente, já que evidenciam de forma rigorosa a presença de picos e vales acentuados. O parâmetro R_y é mais rígido do que $R_{máx}$, já que representa a maior distância pico-a-vale ao longo de todo percurso de medição.

3. METODOLOGIA

A parte experimental deste trabalho foi realizada no LABENGE (Laboratórios de engenharia da Universidade Federal de Viçosa). A preparação do corpo de prova já foi executada em uma empresa de retificação de motores localizada em Viçosa/MG.

3.1 Preparação do cabeçote para os ensaios

Para a realização dos ensaios, foi utilizado um cabeçote de um motor do veículo Volkswagen Gol G-power. O cabeçote utilizado se encontrava em estado de desgaste de vários tipos como oxidação na face inferior e corrosão nos canais de circulação de água de arrefecimento e óleo lubrificante. O cabeçote apresentava também muito empenamento, o que inviabilizaria a manutenção para corrigir esse desvio geométrico. Porém, como se deseja avaliar apenas as características superficiais e sub superficiais da face inferior do cabeçote, não há necessidade de correção desse tipo de defeito.

O cabeçote utilizado foi doado pela empresa de retificação onde o corpo de prova foi preparado, que é especializada em revisão e manutenção completa desse componente e de algumas peças que o compõem. A preparação do cabeçote para os ensaios foi realizada na empresa (com a utilização de suas máquinas-ferramentas e ferramental) e foi executada por seus colaboradores. Na Figura 5 pode ser visto o cabeçote utilizado para os ensaios na condição inicial.

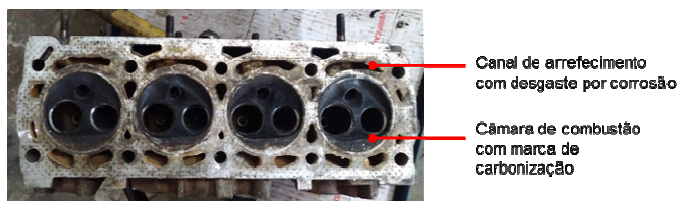


Figura 5 - Cabeçote em estado de desgaste.

A preparação do cabeçote para os ensaios consistiu na realização dos procedimentos de manutenção convencionais para corrigir problemas de desgaste e oxidação na face dos cabeçotes e defeitos de planicidade em metade do componente, onde serão realizados os ensaios. Inicialmente, o cabeçote passou por uma limpeza com óleo diesel seguido de banho por jato d'água. Em seguida, foi imerso em um banho químico por cerca de 5 min em solução descarbonizante, para a retirada de impurezas encrustadas pela carbonização de combustível, de lubrificantes e da junta que une o cabeçote ao bloco do motor. Após o banho químico, o cabeçote foi seco com auxílio de ar comprimido. As partes com marcas de oxidação e carbonização tiveram a camada de impureza retirada pela ação de uma escova de aço rotativa. Na sequência algumas partes desgastadas que necessitavam de preenchimento foram desbastadas por um processo de fresamento (realizado com uma fresadora manual). Tal processo visa a retirada de material para a remoção de óxidos e outras impurezas, preparando as regiões para serem preenchidas por processo de soldagem. A operação foi realizada na borda de um dos canais de circulação de água de arrefecimento, como pode ser visto na Figura 6, e em uma parte da borda da face do cabeçote onde foi simulado um desgaste para preenchimento.

Em seguida as partes fresadas (Figura 6) foram preenchidas com metal de adição através do processo de soldagem TIG (utilizando uma vareta de alumínio como

material de adição). Na Figura 7 pode ser observado a mesma região, após o processo de soldagem e resfriamento.



Figura 6 - Abertura do canal de arrefecimento com borda desbastada por processo de fresamento.

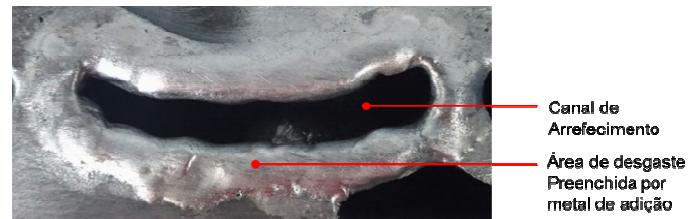


Figura 7 - Abertura do canal de arrefecimento preenchido por processo de soldagem.

Após o preenchimento de metal de adição e resfriamento do cabeçote, foi realizado novamente um processo de fresamento para a correção geométrica dos canais de arrefecimento. O processo foi realizado novamente de forma manual. Assim, a borda do canal de arrefecimento pôde ser reconstituída, apresentando forma e dimensões semelhantes às originais, como pode ser visto na Figura 8.

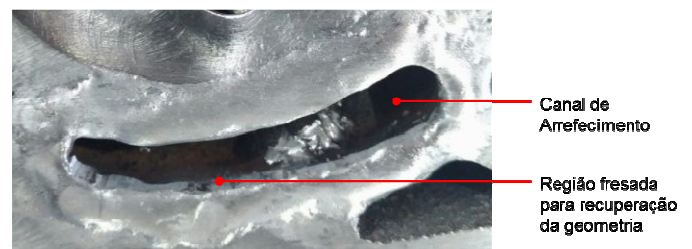


Figura 8 - Abertura do canal de arrefecimento reconstituída após processo de fresamento.

Posteriormente o cabeçote passou pelo processo convencional de aplainamento aplicado para correções de empenamento no cabeçote, bem como para acabamento das regiões que foram preenchidas através de processo de soldagem. O processo de aplainamento foi realizado por uma plaina de blocos e cabeçotes, utilizando uma ferramenta de metal duro para desbaste e uma de diamante para acabamento. O processo de aplainamento foi realizado apenas em metade da face do cabeçote, onde serão realizados os ensaios posteriores.

O processo convencional de aplainamento da face do cabeçote consiste em um passe para desbaste com ferramenta de metal duro, seguido de um passe para acabamento com velocidade de avanço mais lenta e ferramenta de diamante. As especificações das ferramentas utilizadas e parâmetros de usinagem são de segredo industrial da empresa onde os processos foram realizados. Neste caso, uma região do cabeçote recebeu apenas o procedimento de desbaste, enquanto outra recebeu também o processo de acabamento, como pode ser visto na Figura 9. A parte marcada como "Região 1" recebeu apenas o passe de desbaste, enquanto a "Região 2" recebeu também o passe de acabamento.

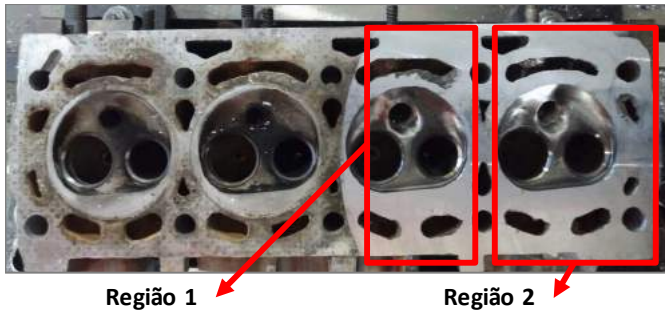


Figura 9 - Face do cabeçote após o processo de aplainamento.

Por fim, foi aplicada uma camada de óleo lubrificante na face do cabeçote para evitar oxidação e o mesmo foi embalado com filme plástico de P.V.C para ser transportado e guardado até a realização dos ensaios.

3.2 Avaliação da rugosidade

A avaliação dos parâmetros de rugosidade visa comparar diferentes parâmetros verticais de rugosidade em regiões que foram preenchidas por processo de soldagem e em seguida passaram por processo de aplainamento com aquelas que também passaram por processo de aplainamento (porém não passaram por processo de preenchimento). Sendo assim, foram escolhidos locais para a medição de rugosidade onde houve preenchimento, locais próximos a esses e locais bem distantes aos que passaram por processo de soldagem, porém que também passaram pelos processos de aplainamento de desbaste e acabamento. Na Figura 10 estão indicados os locais de medição de rugosidade.

Para a medição de rugosidade, a superfície deve estar livre da presença de oxidação, de qualquer tipo de impurezas e até mesmo do filme de óleo que foi aplicado para proteção. Isso pois esses fatores comprometem os resultados das medições e podem danificar a sonda de medição. Portanto, antes da realização dos ensaios a camada de óleo foi retirada pela lavagem do cabeçote com sabão desengordurante. Para se determinar o número de medições de rugosidade em cada local de medição, foi utilizada a metodologia descrita por Bet (1999): adotando-se Ra como parâmetro de referência para se estipular o número de medições, inicialmente devem ser realizadas 5 medições em cada local. Caso o desvio padrão dentre os 5 valores seja menor que 10% da média dentre esses valores, adota-se o valor de 5 medições. Caso contrário, deve-se acrescentar mais 5 medições e repetir o procedimento, até se chegar no limite estabelecido.

Seguindo esta metodologia, foi constatado a necessidade da realização de dez medições de rugosidade em cada região. Isso pois, com a realização de cinco medições, o desvio padrão de Ra ultrapassou 10% do valor médio do mesmo parâmetro em algumas regiões. Com a realização de dez medições, foram obtidos valores de desvio padrão de Ra aceitáveis.

3.3 Ensaios metalográficos e de dureza

A fim de comparar as características da porção de material abaixo da superfície da face do cabeçote onde houve preenchimento por processo de soldagem com as mesmas camadas de onde a superfície passou apenas por processo de aplainamento, foram realizados ensaios de metalografia através de microscopia óptica.

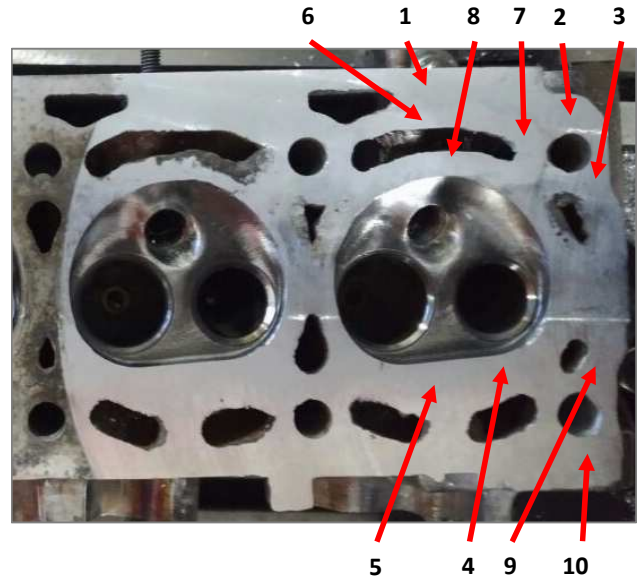


Figura 10 - Locais de medição de rugosidade 1, 2, 3, 4 e 5: sem preenchimento por metal de adição; locais de medição 6, 7, 8, 9 e 10: com preenchimento por metal de adição.

Foram preparados 4 corpos de prova para os ensaios metalográficos: dois pertencendo a uma região que teve a porção superficial preenchida por processo de soldagem e outros 2 de uma região onde a superfície foi apenas usinada por processo de aplainamento. Na Figura 11 estão indicados os locais de onde as amostras foram retiradas. A amostra 1 foi retirada de uma região que foi apenas usinada por processo de aplainamento, sem receber nenhum tipo de preenchimento anteriormente. A amostra 2 foi retirada de uma região que foi preenchida por processo de soldagem e posteriormente plainada, assim como toda a face da metade do cabeçote que foi preparada para os ensaios.

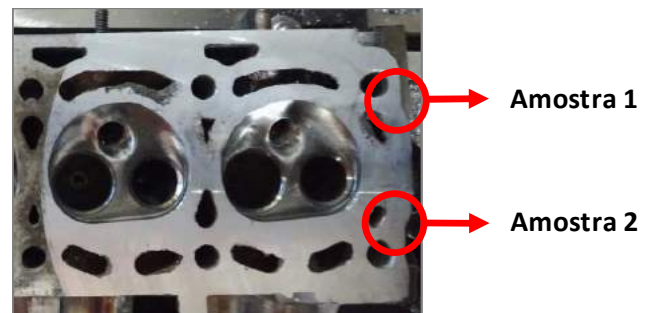


Figura 11 - Locais de onde as amostras serão retiradas para os ensaios de metalografia.

Cada uma das amostras foi dividida em 2 corpos de prova e cada par foi embutido em um mesmo disco de baquelite para facilitar as operações de lixamento e polimento. Em seguida, as amostras foram lixadas em lixa d'água gradualmente, partindo da lixa de numeração 200 até se atingir a 1.500. Depois de lixadas, as amostras foram polidas com abrasivos de 2 μm e 0,5 μm . Seguindo a metodologia de Cunha (2012), as amostras foram observadas em microscópio óptico e fotografadas sem ataque químico. Foram obtidas fotografias da amostra com aumento de 50, 100, 200 e 500 vezes, através de um microscópio óptico com uma câmera acoplada. Para a realização dos ensaios de dureza foram utilizadas as mesmas amostras dos ensaios de metalografia. A escolha dessas regiões se deu por motivo semelhante ao que

levou a serem escolhidas para os ensaios de metalografia, ou seja, para comparar a dureza superficial da face do cabeçote em uma região que não recebeu preenchimento por procedimento de soldagem antes de passar por processo de aplainamento com a dureza superficial em uma região que também passou por processo de aplainamento, mas que anteriormente passou por um processo de soldagem. Foram realizados ensaios de dureza Vickers, que consiste em endentar o material testado com um endentador de diamante, na forma de uma pirâmide reta de base quadrada e um ângulo de 136° entre as faces opostas. Através da máquina de ensaios Vickers é aplicada uma carga de 1 a 100kgf sobre a pirâmide e o material testado, de forma que é imprimida uma endentação de formato aproximadamente quadrado sobre o material testado (Scalet *et al.*, 2016). A partir disso, a Equação (1) foi utilizada para calcular a dureza vickers:

$$H_v = (1,8544 \times F) / d^2 \quad (1)$$

onde H_v é a dureza Vickers [HV], F é a carga aplicada, e d é obtido a partir da média aritmética de d_1 e d_2 , que são obtidas medindo as diagonais do quadrado impresso no corpo de prova pela ação da endentação. Essas medidas não são diretamente indicadas pela máquina de ensaio Vickers, mas podem ser obtidas através de um microscópio acoplado a ela, com uma escala de medição (Scalet *et al.*, 2016).

Para este ensaio foi aplicada uma carga de 20 kgf e foram escolhidas 3 regiões de medição, sendo 1 delas em uma amostra que não contém metal de adição, outra na amostra contendo metal de adição, porém abaixo da marca do cordão de solda e a última na região do cordão de solda. Foram realizadas 5 medições em cada região. Na Figura 12 verificam-se as regiões de medição da dureza. As regiões DS1, DS2 e DS3 correspondem as regiões preenchidas pelo metal de adição por meio do processo de soldagem TIG.

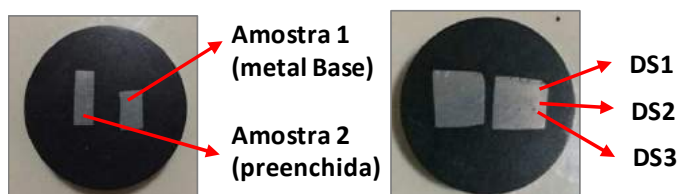


Figura 12 – Descrição das regiões de avaliação da dureza Vickers nas amostras.

4. RESULTADOS

Como as medições foram realizadas no mesmo corpo de prova, o teste proposto por Bet (1999) para estipular o número de medições foi realizado em apenas 4 das regiões escolhidas para os ensaios de rugosidade, sendo elas: 1, 7, 8 e 9. Sendo que a região 1 e 9 passaram por procedimento de soldagem, enquanto a 7 e 8 passaram apenas por processo de aplainamento. Em seguida foram medidos os parâmetros de rugosidade R_a , R_q , R_z e R_y repetidamente, de acordo com o teste anterior, em cada região.

Na Tabela 3 são apresentados os valores médios dos parâmetros de rugosidade R_a , R_q , R_t e R_z obtidos em cada uma das cinco regiões de avaliação não preenchidas por metal de adição e também nas cinco que foram preenchidas. Também são apresentados a média e o desvio padrão relativos a cada parâmetro vertical de rugosidade medido, considerando todas as regiões de avaliação.

Tabela 3 - Valores médios dos parâmetros de rugosidade R_a , R_q , R_t e R_z .

Região	R_a (μm)	R_q (μm)	R_t (μm)	R_z (μm)
1 (não preenchida)	0,654	0,81	6,17	4
2 (não preenchida)	0,65	0,82	5,41	4,08
3 (não preenchida)	0,78	0,94	4,91	4,24
4 (não preenchida)	0,54	0,65	4,39	3,42
5 (não preenchida)	0,62	0,77	5,31	3,93
6 (preenchida)	0,765	0,93	5,37	4,41
7 (preenchida)	0,64	0,82	6,37	4,32
8 (preenchida)	0,54	0,67	4,58	3,35
9 (preenchida)	0,63	0,8	5,09	4,15
10 (preenchida)	0,75	0,97	6,37	5,18
Média	0,65	0,81	5,39	4,10
Desvio Padrão	0,08	0,10	0,70	0,51
Desvio Padrão (% da média)	12,96	13,10	13,12	12,56

A Tabela 3 compõe uma média global de todas as medidas de rugosidade vertical obtidas para cada parâmetro analisado, independente da região da face do cabeçote em que a medida foi tomada. A partir disso, foi calculado também o desvio padrão considerando todas as 100 medições para cada parâmetro (10 em cada região), englobando todas as regiões de interesse. Finalmente, foi calculado o valor percentual do desvio padrão em relação à média. Assim, obteve-se um parâmetro satisfatório para analisar a uniformidade do acabamento superficial obtido pelo processo de usinagem aplicado. Como pode ser observado na Tabela 3, os valores médios obtidos para cada parâmetro são muito discrepantes, o que é esperado, já que são analisados parâmetros de média e de máxima, que possuem naturezas diferentes. Apesar disso, para todos os 4 parâmetros o desvio padrão se aproxima de 13% da média, o que indica um mesmo padrão de uniformidade da superfície sob a ótica dos 4 parâmetros analisados.

As Figuras 13 e 14 apresentam os valores de rugosidade aritmética medidos, respectivamente, nas regiões que não receberam preenchimento por metal de adição e nas regiões que foram preenchidas. Como pode ser observado nos gráficos das Figuras 13 e 14, não há uma relação entre a presença ou ausência de preenchimento por metal de adição nas regiões analisadas com os valores de Rugosidade aritmética média obtidos. Isso pois, esses valores sofrem apenas pequenas oscilações de uma região para outra e essas oscilações ocorrem de forma aleatória nos dois tipos de regiões estudados.

Além disso, como pode ser observado na Tabela 3, O desvio padrão entre os dez valores de R_a obtidos é muito pequeno, cerca de 13% da média. Bet (1999) sugere que valores de desvio padrão de R_a próximos de 10% da média são muito pouco significantes. Pode-se inferir isso pois o autor utiliza disso para obter um parâmetro de escolha do número de medições a serem realizadas em um ensaio de rugosidade. Assim, pode-se perceber uma grande uniformidade nos valores encontrados. Nas Figuras 15 e 16 podem ser observados os valores de rugosidade média quadrática obtidos nas regiões com ausência e presença de sobremetal, respectivamente. A rugosidade média quadrática é mais influenciada pela presença de picos e vales de comprimentos mais elevados quando comparada ao parâmetro de rugosidade R_a . Apesar disto, a oscilação observada nos gráficos das Figuras 15 e 16 é muito parecida com a dos gráficos das Figuras 13 e 14.

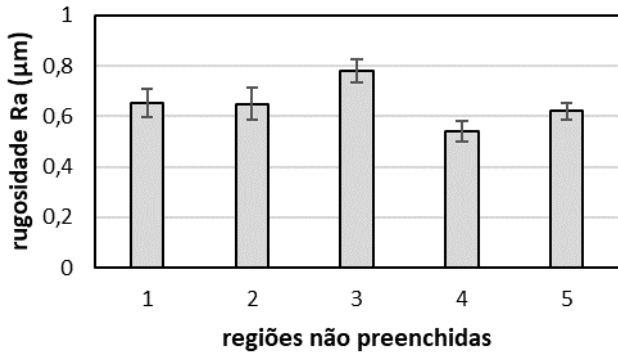


Figura 13 - Rugosidade aritmética média nas regiões não preenchidas por metal de adição.

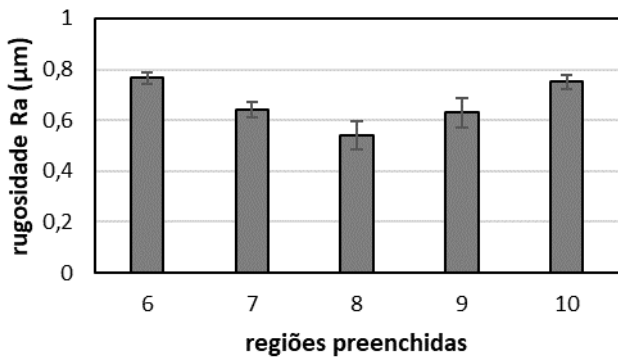


Figura 14 - Rugosidade aritmética média nas regiões preenchidas por metal de adição.

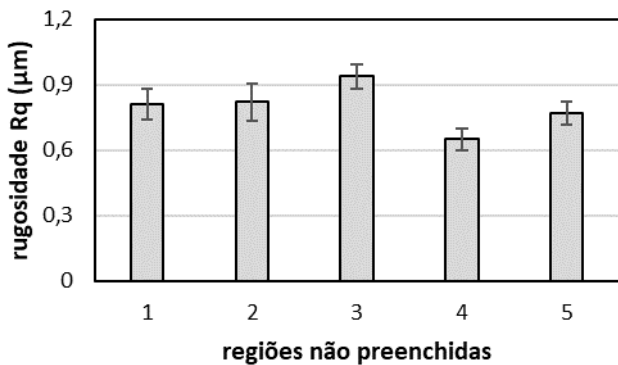


Figura 15 - Rugosidade média quadrática nas regiões não preenchidas por metal de adição.

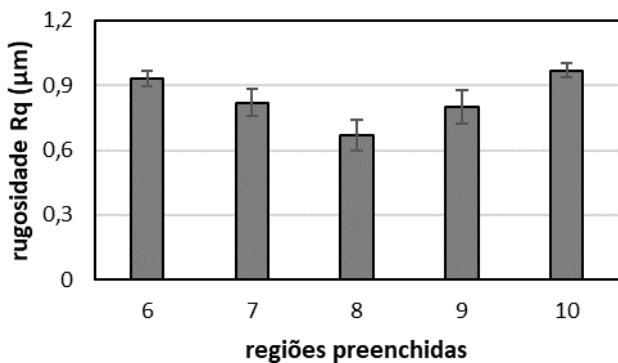


Figura 16 - Rugosidade média quadrática nas regiões preenchidas por metal de adição.

regiões que foram preenchidas. Em seguida, as Figuras 19 e 20 exibem os gráficos do parâmetro de rugosidade Rz medido nas regiões em que não há sobremetal (Figura 19) e nas regiões com sobremetal (Figura 20).

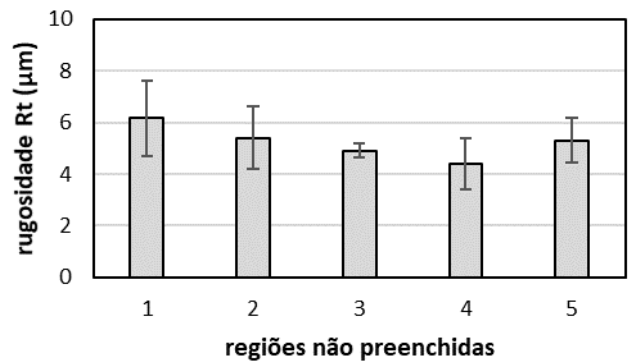


Figura 17 - Altura total do perfil nas regiões não preenchidas por metal de adição.

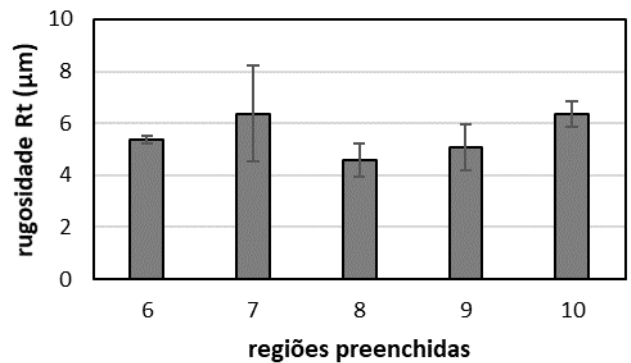


Figura 18 - Altura total do perfil nas regiões preenchidas por metal de adição.

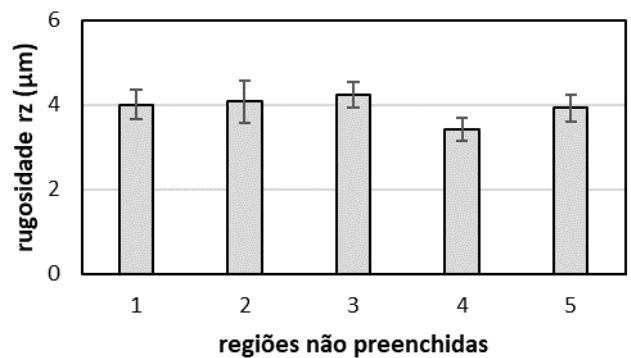


Figura 19 - Altura máxima do perfil nas regiões não preenchidas por metal de adição.

Assim como corrido com os parâmetros de média, os parâmetros de máxima não sofreram significativa variação em relação aos dois tipos de regiões consideradas, ou seja, não foram afetados pela presença de sobremetal. Além disso, era esperado um maior desvio padrão nos valores obtidos dos parâmetros Rt e Rz, em relação aos parâmetros Ra e Rq. Isso pois, esses parâmetros de máxima sofrem grande influência de picos elevados e vales profundos, de forma que a presença isolada de grandes picos e vales aumenta a dispersão dos valores em relação à média. Entretanto, ao analisarmos os valores de Rt e Rz obtidos em todas as dez regiões de medição, o desvio padrão se mantém em torno de 13% da média, como pode ser visto na Tabela 3.

As Figuras 17 e 18 apresentam os valores de altura total do perfil (Rt ou Ry) medidos, respectivamente, nas regiões que não receberam preenchimento por metal de adição e nas

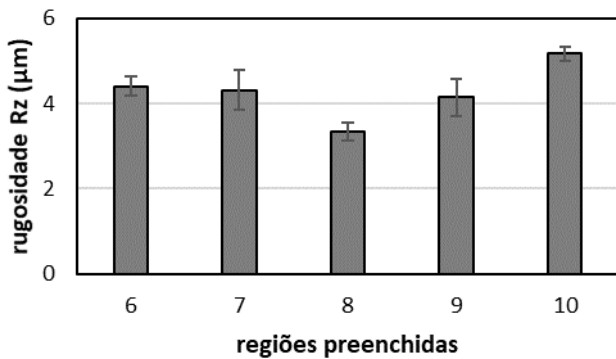


Figura 20 - Altura máxima do perfil nas regiões preenchidas por metal de adição.

Após a análise que foi feita a partir dos parâmetros de rugosidade avaliados, observa-se uma alta uniformidade no acabamento da porção do corpo de prova que recebeu operações de usinagem de desbaste e acabamento. Isso pois, como discutido anteriormente, os valores de rugosidade mensurados apresentaram baixa variabilidade de uma região para outra. Tal fato pôde ser constatado ao se comparar todas as regiões de avaliação, inclusive comparando regiões que receberam preenchimento por metal de adição com as que não receberam.

A variabilidade dos valores médios obtidos em cada região se manteve em um patamar semelhante para os quatro parâmetros de rugosidade avaliados. Isso pode ser observado na tabela 2, que mostra que o desvio padrão obtido ao se comparar os valores médios de Ra, Rq, Rt e Rz em todas as regiões de medição se mantem na casa dos 13%. Além disso, pode-se observar que a presença do metal de adição não alterou a usinabilidade da superfície, já que não houve uma alteração nos parâmetros de rugosidade relacionada à presença de preenchimento nas regiões analisadas. Tal constatação era esperada, pois o processo industrial pelo qual o corpo de prova foi preparado sempre busca utilizar ligas compatíveis com a de constituição do componente como metal de adição. Além disso toma-se o cuidado para que após o processo de soldagem a taxa de resfriamento seja uniforme, tanto quanto possível, em todo o componente.

De acordo com Fuoco *et al.* (2001), as ligas de alumínio mais comuns de serem encontradas em cabeçotes de motores automotivos são as da família alumínio-cobre-silício. Além disso, o autor especifica que dentre essas ligas, as duas tradicionalmente utilizadas pela indústria são a Al-6%Si-3,5%Cu (variante da liga AA319) e Al-8,5%Si-3%Cu (variante da liga AA380). Ao analisar imagens obtidas através de ensaio de metalografia de uma liga deste tipo, espera-se conseguir diferenciar três fases presentes, sendo elas: uma matriz de alumínio e dois precipitados diferentes, sendo um deles formado por cobre e outro por silício. Segundo Araújo (2015), na solidificação de uma liga Al-Si-Cu comumente se formam as 3 seguintes fases: uma matriz de alumínio (Al- α), uma fase intermetálica formada por Alumínio e cobre (Al₂Cu) e partículas isoladas de silício. Na Figura 21 observa-se a metalografia por microscopia óptica obtida de uma amostra retirada de uma região do cabeçote utilizado neste estudo que não recebeu preenchimento por metal de adição.

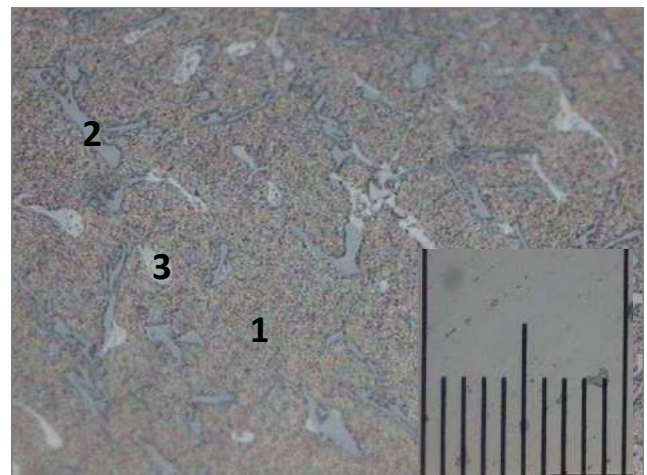


Figura 21 - Metalografia obtida de região não preenchida por metal de adição. Ampliação de 500x. (1) Fase 1; (2) Fase 2; (3) Fase 3.

De fato, na Figura 21 observa-se um composto de três fases, sendo elas: uma matriz de alumínio (Al- α) (fase 1), um precipitado de maior abundancia que pode ser identificado por uma cor levemente azulada na imagem (fase 2) e um segundo precipitado que pode ser identificado por uma cor esbranquiçada na imagem (fase 3). Sabe-se que a matriz do composto observado no microscópio é de alumínio (Al- α), pois há a certeza de que o cabeçote estudado neste trabalho, de onde as amostras foram retiradas é constituído de liga de Alumínio. Entretanto não se pode afirmar a composição dos precipitados, pois a liga utilizada na construção do cabeçote não é revelada pela indústria. Além disso, neste trabalho não foram feitas análises em microscópio eletrônico de varredura para identificação dos compostos. Apesar disto, baseando-se no estudo de Fuoco *et al.* (2001), e na observação através da metalografia da proporção entre as fases, acredita-se que se trata de uma liga Al-8%Si-3%Cu. Sendo assim, é possível que a fase 2 seja composta por um precipitado intermetálico (Al₂Cu) e que a fase 3 seja formada por partículas de silício.

Nas Figuras 22 a 24 pode-se observar imagens obtidas por metalografia de amostras do cabeçote retiradas de uma região que recebeu preenchimento por metal de adição. As imagens foram obtidas de sub-regiões nomeadas como DS1, DS2 e DS3, que residem em profundidades diferentes a partir da face inferior do cabeçote. Além disso, em cada figura podem ser observadas imagens de cada sub-região com ampliações de que vão de 50 até 500 vezes.

A sub-região DS1 está imediatamente abaixo da superfície da face do cabeçote onde os processos de reparo foram realizados. Na Figura 22(a) isto pode ser constatado ao se observar o limite da amostra aonde se inicia o baquelite – material em cor negra utilizado para embutir a amostra. Ainda na imagem A, de menor ampliação, ao observá-la da parte superior direita para a inferior esquerda podem ser identificadas 3 zonas da amostra, sendo elas: zona do metal de solda, zona afetada pelo calor e início da zona do metal base inalterado. Tais zonas podem ser diferenciadas pelo aumento do tamanho dos grãos da parte superior direita para a inferior esquerda. A Figura 23 representa a metalografia obtida da sub-região DS2, com ampliações 100, 200 e 500x.

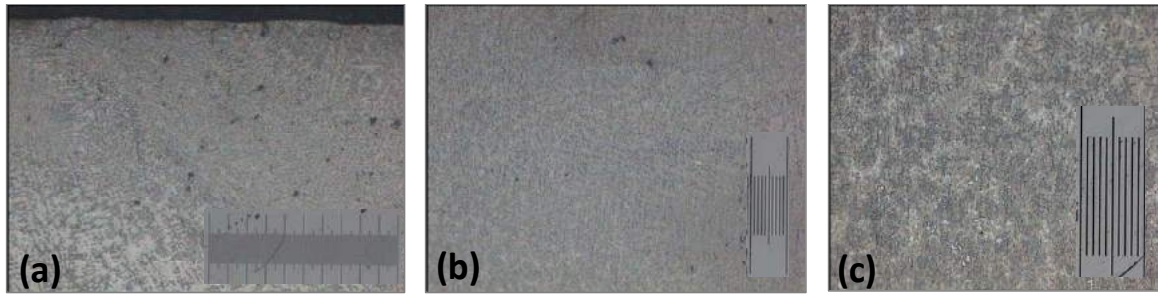


Figura 25: Metalografia da sub-região DS1: (a) ampliação de 50x; (b) ampliação de 100x; (c) ampliação de 200x.

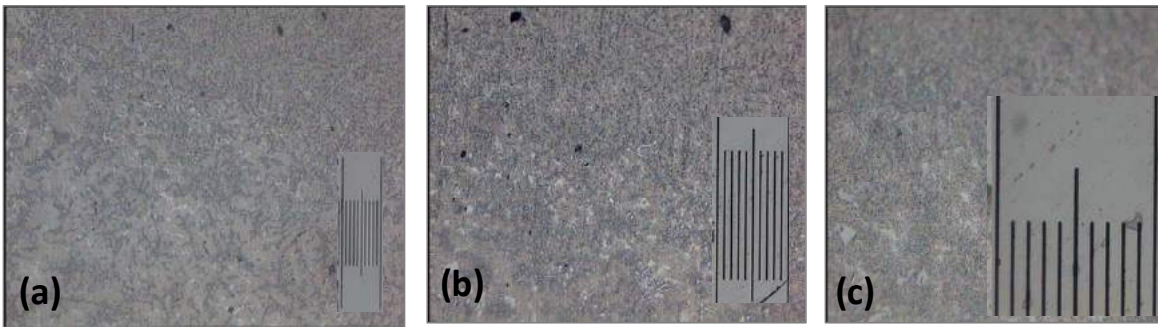


Figura 26 - Metalografia da sub-região DS2: (a) ampliação de 100x; (b) ampliação de 200x; (c) ampliação de 500x.

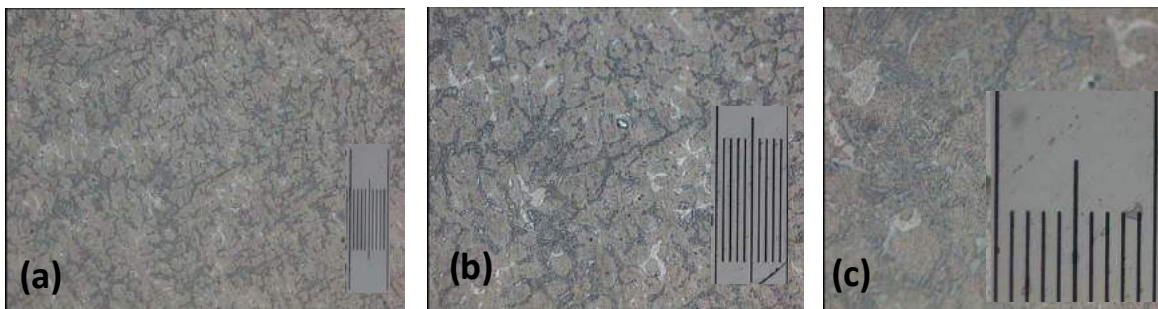


Figura 27 - Metalografia da sub-região DS3: (a) ampliação de 100x; (b) ampliação de 200x; (c) ampliação de 500x.

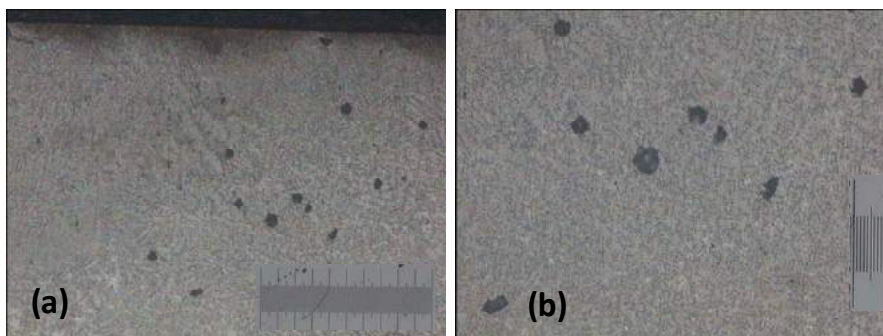


Figura 28 - Metalografia da sub-região DS1, evidenciando defeitos de solda: (a) ampliação de 50x; (b) ampliação de 100x.

A sub-região DS2 está logo abaixo da DS1, se aproximando da região em que não houve mistura do metal base com o metal de adição e da zona do metal base inalterado. Pode-se perceber isso pois nas imagens é possível observar o crescimento dos grãos da parte superior para a inferior. Na Figura 24 pode ser verificada a metalografia obtida da sub-região DS3, também com ampliações 100, 200 e 500x. A sub-região DS3 está abaixo de DS2. Pode-se perceber que a sub-

região DS3 já mostra o metal base inalterado. Isso pois, fazendo uma comparação da Figura 24 com a Figura 21, percebe-se uma composição semelhante, com os mesmos precipitados e grãos de tamanho semelhante. Ao comparar-se as Figuras 22 e 23, que mostram a região do cordão de solda, com a Figura 21, que representa o metal base, pode-se perceber que os materiais do metal base e do metal de adição são de composições diferentes, pois enquanto no metal base observa-

se a presença de três fases, no metal de solda é possível ver apenas duas. Além disso, observa-se no cordão de solda uma estrutura menor de grãos e uma maior solubilidade dos elementos de liga.

Na Figura 25, está novamente evidenciado a sub-região DS1, para análise de efeitos de solda. Observando esta figura fica evidente a presença de manchas escuras na região do cordão de solda. Tais manchas indicam a ocorrência de porosidade na região. Como explicado anteriormente, a ocorrência de porosidade em uma zona de solda em liga de Alumínio pode ocorrer por dois fatores ou por uma junção dos dois. O primeiro deles é a alta taxa de solidificação, impedindo a expulsão de gases. Entretanto, como foi observado uma grande diminuição da estrutura dos grãos na zona de solda em relação ao metal base, pode-se concluir que a taxa de solidificação não foi excessivamente alta. O segundo fator que pode gerar porosidade na solda é o excesso de formação de gases quando o metal é fundido, podendo ser gerados pela presença de impurezas na região de solda, como umidade ou restos de lubrificantes por exemplo.

A Figura 26 apresenta de forma gráfica os resultados das 5 medições de dureza obtidas nas amostras de metal base, ou seja, amostras retiradas da região que não foi preenchida por metal de adição. O valor médio de dureza Vickers calculado nesta região foi de 97,19 e o desvio médio foi de 3,85. A Figura 27 apresenta graficamente os resultados das 5 medições de dureza Vickers obtidas na sub-região DS1 das amostras preenchidas por metal de adição, ou seja, na região do cordão de solda. Nesta sub-região, o valor médio calculado da dureza Vickers foi de 80,34 e o desvio médio foi de 4,57.

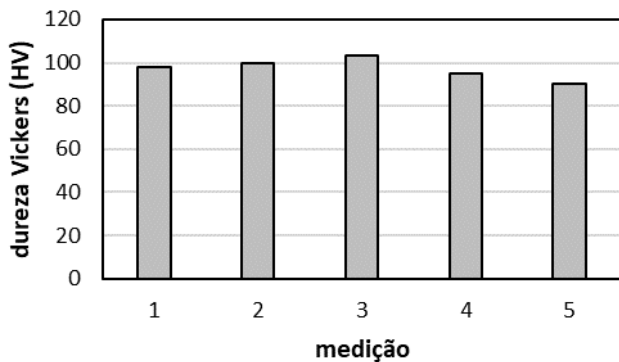


Figura 26 - Medições de dureza Vickers em amostras de região não preenchida por metal de adição.

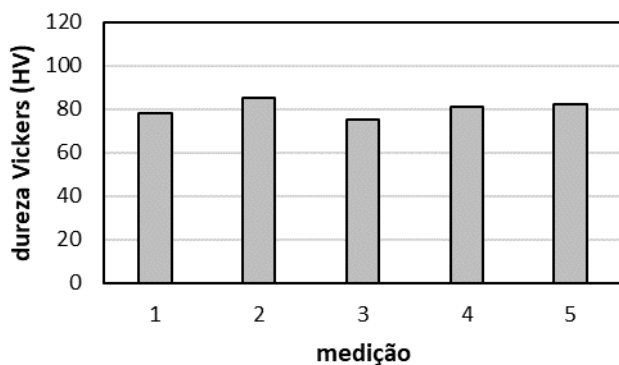


Figura 27 - Medições de dureza Vickers em amostras de região preenchida por metal de adição na sub-região DS1.

A Figura 28 apresenta um gráfico com as 5 medições de

dureza Vickers obtidas na sub-região DS3 das amostras preenchidas por metal de adição, ou seja, medições realizadas abaixo da região do cordão de solda. O valor médio de dureza Vickers calculado na sub-região DS3 foi de 96,09 e o desvio médio foi de 1,76.

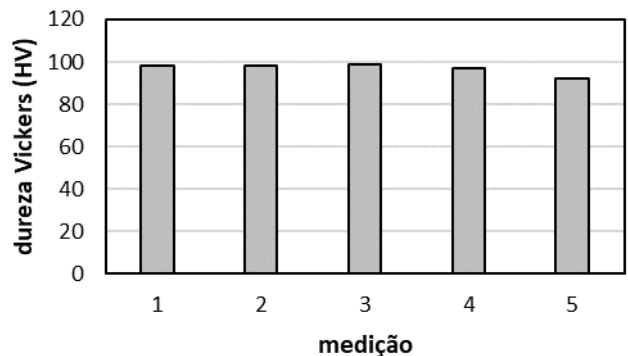


Figura 28 - Medições de dureza Vickers em amostras de região preenchida por metal de adição na sub-região DS3.

Diferente do que foi constatado anteriormente, ao comparar os resultados das medições de dureza vickers obtidos na região do cordão de solda (DS1) com a região do metal base e com a região DS3, percebe-se que a região afetada pela solda apresenta um decréscimo de dureza de cerca de 16 ou 17%. Por apresentar uma maior ductilidade, a região preenchida por metal de adição pode sofrer desgastes de forma mais acelerada.

4. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi avaliar a qualidade superficial da face inferior do cabeçote de um motor automotivo após passar por processos convencionais de manutenção. Parâmetros como os de rugosidade superficial e dureza superficial foram avaliados em regiões (da face do cabeçote de um motor) que passaram por processo manutenção por aplainamento. Em seguida os mesmos parâmetros foram avaliados em regiões que passaram também por processo de aplainamento mas que receberam anteriormente preenchimento de metal de adição por processo de soldagem TIG. Além disso, também foi avaliada a microestrutura dos materiais nas duas regiões. A partir disso, puderam ser tomadas algumas conclusões:

- Em relação à avaliação de rugosidade, foi observado um comportamento semelhante dos parâmetros Ra, Rq, Rt e Rz. Não foi constatada uma alteração significativa desses parâmetros relacionada à presença ou não de metal de adição nas regiões avaliadas. Além disso, a dispersão da média dos valores de rugosidade medidos em todo o corpo de prova, para todos os parâmetros é insignificante. Com isso, pode-se concluir que o processo de usinagem pelo qual a face do cabeçote passou proporcionou à região um acabamento superficial uniforme;
- Os ensaios de metalografia mostraram que foi utilizado um metal de adição de composição diferente da liga que constitui o cabeçote analisado. Apesar disso, não foi possível identificar com precisão a liga de alumínio que constitui o cabeçote e o metal de adição. Portanto, para estudos mais aprofundados nesta área, é aconselhado a realização de ensaios de difração por EDX ou EDS em

um Microscópio Eletrônico de Varredura, podendo assim identificar a composição dos elementos de liga;

- Ainda nos ensaios de metalografia, foram identificados defeitos de porosidade na região de solda. Tais discontinuidades também contribuem para decréscimo da resistência mecânica do material na região de preenchimento, o que pode acarretar um desgaste acelerado do componente remanufaturado. Tal problema é possível de ser corrigido com alguns cuidados, principalmente se atentando à pureza do gás de proteção utilizado no processo de soldagem e à limpeza da região a ser soldada antes de passar pelo processo;
- Foi constatado um decréscimo de dureza nas regiões com preenchimento por metal de adição em relação às regiões contendo metal base inalterado, o que pode ser atribuído à utilização de um material diferente do metal base como metal de adição. Assim, para estudos futuros, torna-se interessante a avaliação da região soldada com o preenchimento por outros materiais;
- Os processos de aplainamento e preenchimento por soldagem podem ser aplicados à face de um cabeçote de alumínio praticamente sem afetar a uniformidade do acabamento superficial. Por outro lado, o processo de preenchimento por soldagem pode diminuir a resistência mecânica do componente de forma localizada, podendo acelerar o desgaste das regiões reparadas com o motor em operação.

Os processos de manutenção abordados neste trabalho também podem ser utilizados para uma recuperação mais complexa de cabeçotes quando estes apresentam um problema conhecido como “perda da altura de face”. Tal defeito ocorre quando o cabeçote apresenta um grau de empenamento ao qual uma correção por aplainamento acarretaria em uma diminuição da altura entre faces do cabeçote tornando-a menor do que a mínima operacional. Assim, é possível preencher toda a face do cabeçote através de um procedimento de soldagem. Em seguida reconstitui-se todos os contornos e canais da face do cabeçote por processo de usinagem de fresamento, com uma fresadora CNC. Finalmente o processo de aplainamento pode ser aplicado, recuperando totalmente as dimensões do cabeçote. A partir do que foi desenvolvido neste trabalho, estudos futuros podem ser aplicados a este último processo de recuperação mencionado.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, E. C. C. Solidificação direcional horizontal de uma liga Al-Cu-Si: interrelação entre parâmetros térmicos, microestrutura e microdureza. 2015. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.
- BET, L. Estudo da medição da textura de superfícies com sondas mecânicas e com sondas ópticas tipo seguidor. 1999. 243 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.
- BRUNETTI, F. Motores de combustão interna. São Paulo: Blucher, v. 1, 2012.
- CUNHA, R. P. Caracterização mecânica e metalográfica de uma liga de alumínio empregada para cabeçote de motor flex. 2012. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- FERRARESI, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais. 4ª edição. São Paulo: Edgard Blucher, 1977.
- FUOCO, R. *et al.* Liga a base de alumínio para a produção de cabeçotes de motor sem tratamento térmico. 2001.
- FURLANI, C. E. A.; SILVA, R. P. Apostila Didática N° 2 - Motores de Combustão Interna. 2006.
- GROOVER, M. P. Fundamentos da Moderna Manufatura Versão SI - Vol. 1. 5ª edição. LTC. 2017.
- HK Máquinas, 2019. Disponível em: <<http://www.hkmaquinas.com.br/imagens/plaina-pbc-900-grande.jpg>> Acessado em: 29 de junho, 2019.
- MACHADO, A. R. *et al.* Teoria da Usinagem dos Materiais. 1ª edição. São Paulo: Edgard Blucher, 2009.
- MACHADO, I. G. Soldagem & técnicas conexas: processos. Ed. do Autor, 1996.
- MARQUES, P. V. MODENESE, P. J. BRCARENSE, A. Q. Soldagem: Fundamentos e Tecnologia. Editora UFMG, 2009.
- SCALET, C. L. *et al.* Conceitos, características, propriedades e metodologias de aplicação de ensaios mecânicos de dureza. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, IFSP. Campus Salto: São Paulo. 2016.
- TILLMANN, C. A. C. Motores de combustão interna e seus sistemas. Pelotas: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia. Universidade Federal de Santa Maria; Rede e-Tec Brasil, 2013.