

EMPREGO DO PROCESSO PTA-P NO REVESTIMENTO DE MOLDES DE INJEÇÃO DE ALUMÍNIO: FUNDAMENTOS E PERSPECTIVAS

Kamila Borba Silva, kamila.borba@posgrad.ufsc.br¹

Tiago Vieira da Cunha, t.cunha@ufsc.br¹

Carlos Maurício Sacchelli, carlos.sacchelli@gmail.com¹

¹ Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville, SC, Brasil

Resumo: A aplicação de peças em alumínio injetado em alta pressão é uma tecnologia cada vez mais utilizada no setor automotivo pela constante busca para a fabricação de componentes de baixo peso. Neste contexto, tem-se os moldes de injeção de alumínio que são constantemente expostos a esforços repetitivos, sofrendo desgaste e fadiga térmica, que afetam a qualidade do componente injetado e podem resultar na sua falha. Portanto, torna-se vital o desenvolvimento de novas tecnologias visando a melhoria da vida útil das ferramentas de injeção de alumínio. Neste cenário, como parte de uma estratégia do Governo Federal para ampliar a inserção global da indústria automotiva brasileira foi instituído o Programa Rota 2030. No âmbito do Rota 2030 têm-se o projeto intitulado “Melhoria no projeto de ferramentas de injeção de alumínio”, coordenado pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em parceria com outros Institutos de Ciência e Tecnologia (ICTs) para buscar uma melhoria das ferramentas de injeção. Neste contexto, uma das alternativas no qual se vislumbra grande potencial é o emprego de revestimentos por soldagem. Neste contexto, o processo de plasma de arco transferido com alimentação de material na forma de pó (PTA-P) possui considerável destaque, pela capacidade de realizar depósitos com baixo valor de diluição e bom acabamento superficial. Considerando o potencial de aplicação desta técnica, o presente trabalho tem o objetivo de prospectar o processo PTA-P no estudo de revestimentos em cavidades e insertos de moldes de injeção de alumínio. Propõem-se, portanto, empregar uma metodologia com o intuito de caracterizar a influência dos parâmetros do processo PTA-P como corrente de soldagem, velocidade de soldagem, vazão do gás de plasma, taxa de alimentação de material de adição e distância bico-peça na morfologia dos depósitos e descontinuidades. Além disso, avaliar a quantidade de camadas necessárias e diferentes estratégias de deposição de material com o propósito de recobrir uma determinada área superficial de modo a conferir ao revestimento características conforme requisitos definidos. Logo, vislumbra-se a aplicação do PTA-P como uma alternativa potencialmente viável na obtenção de moldes de injeção de alumínio mais eficientes, dotados de características superiores no que se refere a sua vida útil e com menor custo.

Palavras-chave: Moldes de injeção de alumínio, Programa Rota 2030, PTA-P, Revestimento, Diluição

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, um dos desafios do setor automotivo nacional é buscar soluções para atender à necessidade por veículos mais econômicos e com melhor desempenho. Neste contexto, o aumento da aplicação de peças em alumínio injetado em alta pressão é uma tecnologia utilizada devido à busca pela fabricação de componentes de baixo peso. Segundo IAL (2019), por exemplo, na China no ano de 2019 em um veículo de passeio havia cerca de 93 Kg de alumínio injetado e a previsão para 2030 é aumentar para próximo de 135 Kg. Refletindo o aumento neste mercado, pois em 2021 se estima um consumo na ordem de 14 bilhões de dólares, aumentando até 2027 para cerca de 20 bilhões de dólares, tendo a indústria automotiva como principal destino, girando em torno de 60% da demanda (Mordor, 2022).

Para atender esta demanda são necessários os moldes de injeção, que durante os seus ciclos de moldagem são expostos a esforços repetitivos e grandes variações de temperatura em cada ciclo. Devido à ação desses esforços, os moldes de injeção trabalham nas mais distintas condições, sofrendo desgaste e fadiga térmica, que afetam a qualidade do componente fabricado e resultam em uma eventual falha da ferramenta de molde de injeção (Gonçalves, 2012). Portanto, impactando diretamente nos custos do processo pela elevada despesa com a manutenção dos moldes, tempo de parada de máquinas e o retrabalho de peças. Logo, torna-se fundamental o desenvolvimento de técnicas visando à melhoria da vida útil das ferramentas de injeção de alumínio, através do estudo de novas tecnologias.

Visando o desenvolvimento do setor automotivo no país, foi instituído o Programa Rota 2030 como parte de uma estratégia do Governo Federal para ampliar a inserção global da indústria automotiva brasileira e, assim, aumentar a competitividade do setor automotivo nacional pela redução de custos, como também pela inovação tecnológica, através

da exportação de veículos e autopeças (Rota 2030, 2021). Portanto, o Rota 2030, visa fomentar o desenvolvimento de projetos de Pesquisa e Desenvolvimento de Inovação Tecnológica em toda a cadeia do setor.

Em destaque dentro do setor automotivo está o setor ferramenteiro, para tanto, no Programa Rota 2030 foi criada a Linha IV intitulada de “Ferramentarias Brasileiras mais Competitivas”, com o objetivo de solucionar as dificuldades de empresas com baixa produtividade e atraso tecnológico, ao permitir o desenvolvimento da cadeia de ferramental de produtos automotivos (FUNDEP, 2021). Neste contexto, têm-se o projeto intitulado de “Melhoria no projeto de ferramentas de injeção de alumínio”, coordenado pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em parceria com outros Institutos de Ciência e Tecnologia (ICTs), que tem por objetivo investigar o emprego de diferentes tipos de materiais, de tratamentos superficiais, revestimentos e técnicas de adição de materiais em moldes de injeção de alumínio, buscando uma melhoria nas propriedades de resistência ao desgaste e à fadiga térmica, tendo em vista que estes são os principais mecanismos de falhas associados ao ciclo de injeção de alumínio em moldes. Neste contexto, vislumbra-se a aplicação da soldagem de revestimento, como uma alternativa potencialmente viável na obtenção de moldes de injeção dotados de características superiores no que se refere a sua vida útil. Dentre os processos de soldagem a arco empregados em aplicações de revestimento, o de plasma de arco transferido com alimentação de material na forma de pó (PTA-P) encontra-se numa posição de destaque. Isto é devido a sua capacidade de realizar depósitos que permitem conferir características específicas à superfície dos revestimentos, com um bom acabamento superficial e, sobretudo, baixo valor de diluição de modo a preservar as características químicas do metal depositado. Além de ser um processo de soldagem que possibilita a sua aplicação como alternativa em aplicações de manufatura aditiva (MA) pela deposição de material na forma de pó em camadas consecutivas, formando um revestimento superficial. É importante ressaltar que o equipamento necessário para a aplicação do processo PTA-P possui custo extremamente inferior, quando comparado com a tecnologia MA. Contudo, não se observa na literatura, tampouco, no setor industrial, a aplicação deste processo de soldagem para o revestimento superficial em moldes de injeção de alumínio. Assim, considerando o potencial de aplicação deste processo e a lacuna existente neste setor chave na cadeia produtiva automotiva, o presente trabalho tem o objetivo de prospectar a aplicação do processo PTA-P no revestimento de componentes de moldes de injeção de alumínio a fim de buscar soluções que promovam ferramentas mais eficientes, com menor custo e melhoria em sua vida útil. Propõe-se, portanto, avaliar a influência dos parâmetros do processo PTA-P nas características morfológicas dos depósitos realizados buscando uma condição de maior largura, baixo valor de diluição e bom acabamento superficial. Além disso, avaliar a quantidade de camadas necessárias e os efeitos das diferentes estratégias de deposição de material com o propósito de recobrir uma determinada área superficial de modo a conferir ao revestimento características conforme requisitos definidos.

2. MOLDES DE INJEÇÃO DE ALUMÍNIO

A injeção de alumínio é um processo de fabricação de grande importância e está em constante desenvolvimento tecnológico, sendo a indústria automobilística a mola propulsora para o crescimento do mercado de alumínio fundido sob pressão. A demanda por componentes fabricados em ligas de alumínio está em crescimento por tratar-se de um material com baixa densidade, acarretando em baixo peso e, conseqüentemente, numa melhor eficiência energética para o veículo (Concer, 2011 e Vendramim, 2021). O processo de injeção sob pressão permite uma alta produtividade, assim como a produção de peças com elevada complexidade geométrica e pequena espessura de paredes (Concer, 2011).

O molde de injeção de alumínio, sendo formado por vários componentes, que sofrem durante o processo grandes tensões de origem térmica, devido ao choque térmico entre o aço da matriz e o alumínio líquido, afetando a sua vida útil (Gallo *et al.*, 2011). A temperatura do alumínio líquido injetado é de cerca de 700°C, com velocidade na faixa de 30 a 100 m/s, promovendo a dilatação da superfície de trabalho da ferramenta, seguida de uma contração em cada ciclo de injeção, assim como a sua erosão superficial (Concer, 2011; Gonçalves, 2012 e Lin *et al.*, 2006). Este fenômeno é responsável por 80% das falhas nos moldes de injeção sob pressão para trabalho a quente (Concer, 2011 e Gonçalves, 2012). O número de ciclos e, conseqüentemente, a vida útil de um molde de injeção é afetada majoritariamente pelo fenômeno da fadiga térmica. Durante um ciclo de injeção, o aço das cavidades do molde devido a alta temperatura sofre uma oxidação o que reduz a sua resistência à fadiga térmica (Concer, 2011). Uma vez que a tensão aplicada no material ultrapassar o seu limite de escoamento ocorrerá a deformação plástica deste, resultando na nucleação e propagação de microtrincas térmicas nos moldes de injeção, podendo evoluir para trincas catastróficas.

O mecanismo de erosão do molde também pode ocorrer pelo processo de cavitação, devido à implosão de bolhas de gás dentro do fluxo de alumínio líquido sob alta pressão, promovendo o desgaste da ferramenta. Outro mecanismo de falha nos moldes é o desgaste abrasivo, decorrente do escoamento do material injetado no molde (Amorim, 2002), podendo ser controlado pela correta escolha do material da ferramenta e sua determinada dureza. Uma possibilidade para o aumento de sua vida útil é de revestir a superfície do molde com materiais especiais nas regiões mais sujeitas ao desgaste. As cavidades dos moldes de injeção sob pressão são afetadas também pela aderência e corrosão química, sendo estes mecanismos de falhas nas cavidades dos moldes de injeção (Concer, 2011; Gonçalves, 2012 e Vendramim, 2021).

Segundo Lin *et al.* (2006), a aderência e a corrosão química são causadas pela reação química de difusão entre a liga de alumínio injetado e o ferro (Fe) do aço da cavidade do molde. Como resultado da difusão são formados compostos intermetálicos na superfície da cavidade que podem se destacar causando a perda de material e a deteriorização da superfície da cavidade e, portanto, é estabelecido o processo de desgaste por corrosão da cavidade do molde. Ademais,

em regiões da cavidade de menor temperatura ou de menor contato entre o alumínio líquido injetado e o Fe durante o ciclo de injeção, a camada de composto intermetálico é mais fina e adere na superfície da cavidade do molde.

Ao buscar por cavidades estáveis e de alta qualidade, resultando em peças fundidas com elevada qualidade superficial e menor frequência de parada para manutenção da ferramenta, torna-se necessário a busca por soluções que minimizem os principais mecanismos de falhas encontrados nos moldes de injeção sob pressão. Para tanto, a literatura aponta que deve ser realizada a correta seleção do material para fabricação da ferramenta de injeção. Relativo a isso, no processo de fundição sob pressão são utilizados os aços ferramenta para trabalho a quente na fabricação dos moldes ou matrizes de injeção. Os aços para o trabalho a quente são altamente ligados e garantem uma elevada dureza, resistência ao desgaste e pequena variação de suas propriedades mecânicas ao serem submetidos a altas temperaturas (Concer, 2011; Gallo *et al.*, 2011 e Gonçalves, 2012). Neste contexto, o grupo H dos aços é amplamente utilizado na fabricação de moldes de injeção de alumínio, por ser um grupo de aços especiais de alta liga que combina teores de carbono que variam de 0,35 a 0,45%, combinados com teores de cromo, tungstênio, molibdênio e vanádio entre 6 e 25% (Amorim, 2002; Concer, 2011 e Gonçalves, 2012). Dentro dessa família os aços AISI H13 e o H11 são utilizados para fabricação dos moldes de injeção, por serem materiais que apresentam uma boa resistência à fadiga térmica, assim como uma boa combinação de resistência ao revenimento e tenacidade a temperaturas elevadas (Concer, 2011; Gallo *et al.*, 2011 e Gonçalves, 2012).

A seleção correta do material a ser empregado na fabricação dos moldes de injeção é apenas um dos fatores e, exclusivamente, não garante a melhoria da vida útil da ferramenta. É necessária atenção ao projeto, processo de fabricação da ferramenta, ao processo de injeção sob pressão e, ainda, tratamentos térmicos e de superfícies a serem aplicados (Concer, 2011; Gallo *et al.*, 2011 e Gonçalves, 2012). Em alguns casos há o uso de tratamentos superficiais que agem como uma barreira à difusão de alumínio líquido, impedindo que haja interação com o substrato ferroso (Lin *et al.*, 2006), como por exemplo, a nitrocarbonetação, nitretação de íons e a deposição de revestimentos duros, especialmente pelo processo PVD (*Physical Vapor Deposition*) e CVD (*Chemical Vapor Deposition*) (Amorim, 2002; Concer, 2011; Gallo *et al.*, 2011 e Gonçalves, 2012).

Com o desenvolvimento acelerado do setor de fabricação de injeção de alumínio, muitos são os estudos que visam o aprimoramento dos moldes, entretanto, ainda há espaço para estudos que visem a melhoria de sua vida útil.

3. PROCESSO PTA-P

Considerando o cenário exposto, uma solução consiste no revestimento da superfície do molde que é sujeita ao desgaste, através da soldagem de revestimento com um material que seja mais resistente. Dentre os diversos processos de soldagem empregados para o revestimento superficial, o PTA-P tem apresentado destaque. Isto se deve, sobretudo, a sua capacidade de realizar depósitos com um bom acabamento superficial, aliada a taxas de deposição compatíveis a de outros processos e baixo valor de diluição. A diluição afeta fortemente as propriedades mecânicas e metalúrgicas dos depósitos, portanto, deve ser efetivamente controlada pela correta seleção dos parâmetros do processo a fim de se obter um revestimento com propriedades desejadas. Um baixo valor de diluição preserva as propriedades desejadas da liga que está sendo depositada sobre o substrato, o que reduz a exigência quanto ao número mínimo de camadas sobrepostas necessárias para que a superfície apresente as propriedades de resistência requerida. Logo, reduz custos com consumíveis mais nobres usados para o revestimento (Balasubramanian *et al.*, 2009; Lakshminarayanan *et al.*, 2008 e Silva, 2010).

Alguns parâmetros do processo PTA-P afetam diretamente a morfologia e diluição do depósito e, portanto, na qualidade do revestimento. Entre eles estão a vazão de pó, corrente de soldagem, velocidade de soldagem e emprego do tecimento (Balasubramanian *et al.*, 2009; Lakshminarayanan *et al.*, 2008 e Silva, 2010), vazão de gás de plasma, composição química dos gases e materiais utilizados, como substrato e de adição, diâmetro do orifício de restrição do arco, granulometria do pó (Silva, 2010) e a distância bico-peça (Balasubramanian *et al.*, 2009; Lakshminarayanan *et al.*, 2008 e Tigrinho, 2005). Sabe-se que a intensidade da corrente de soldagem afeta diretamente o aporte de calor ao substrato. Elevadas correntes de soldagem causam excesso de diluição, portanto, de acordo com Silva (2010) e Tigrinho (2005) o aumento da corrente de soldagem deve ocorrer em conjunto com o aumento da taxa de alimentação do pó, de modo a evitar o aumento excessivo da diluição. Entretanto, nos casos em que o valor da corrente de soldagem é mantido e é alterada a taxa de alimentação do pó, quanto maior o valor da taxa de alimentação do pó, conseqüentemente, menor será a diluição, conforme pode ser observado na Figura 1. Isso, porque a poça de fusão apresenta um efeito de isolante térmico entre o arco voltaico e o metal de base (Silva, 2010). E quanto maior quantidade de pó alimentado, mais calor é retirado do arco para fundir o material adicionado. Da mesma forma, em situações em que se utiliza uma maior granulometria do pó, então, mais calor do arco principal é retirado para fundir o material, o que reduz a diluição do processo. Ademais, percebe-se que quanto maior a vazão do gás de plasma, mais calor é transferido para a peça, concentrando uma maior energia para a fusão do substrato e, conseqüentemente, aumentando o valor da diluição (Silva, 2010 e Tigrinho, 2005).

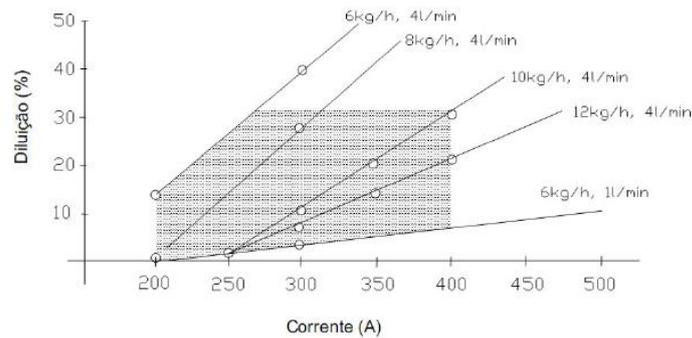


Figura 1. Diluição versus corrente do arco principal em diferentes vazões de pó e de gás de plasma (Silva, 2010)

Na literatura encontram-se trabalhos nos quais o processo PTA-P é utilizado para o revestimento de uma superfície e nestes os autores analisam a influência de alguns parâmetros do processo de soldagem nos aspectos morfológicos dos depósitos. Neste contexto, Silva (2010) ao utilizar chapas de aço carbono 1020 como substrato e pó metálico de aço inoxidável AISI 316L atomizado, em granulometrias em 50-90 μm , analisou o impacto do aumento da corrente média de soldagem na geometria do cordão de solda para taxas de alimentação de material de 9,5 e 11,5 g/min. Com taxa de alimentação de 9,5 g/min, Silva (2010) obteve que os valores de penetração máxima do cordão entre 0,08, 0,16, 0,66 e 0,74 mm para correntes de soldagem de aproximadamente 50, 70, 110 e 150 A, respectivamente. Considerando os mesmos valores de corrente de soldagem, o autor obteve valores de largura do cordão de solda iguais a 5,34, 5,71, 8,78 e 9,35 mm, respectivamente. E ao avaliar o impacto da taxa de alimentação de 9,5 g/min no valor do reforço do cordão de solda obteve valores iguais a 2,47, 2,40, 1,73 e 1,57 mm para correntes de soldagem de 50, 70, 110 e 150 A, respectivamente. Ao aumentar a taxa de alimentação para 11,5 g/min, o autor obteve valores de penetração máxima do cordão de solda iguais a 0,07, 0,28, 0,93 e 2,14 mm para correntes de soldagem em torno de 70, 110, 150 e 190 A. Para a taxa de alimentação de 11,5 g/min, os valores da largura obtidos pelo autor foram de 6,44, 7,44, 10,44 e 14,03 mm, enquanto que o valor do reforço entre 2,21, 2,18, 1,91 e 1,78 mm, para a mesma faixa de corrente de soldagem anterior. Portanto, percebe-se que para as taxas de alimentação de pó analisadas ocorre o aumento da penetração e largura com o aumento da corrente de soldagem, entretanto, o autor constata a redução dos valores de reforço do cordão de solda com o aumento da corrente de soldagem. Isso ocorre, visto que ao comparar o aumento da corrente de soldagem para uma mesma taxa de alimentação de material de adição, tem-se que parcela da energia é necessária para a fusão do material de adição em pó e a energia adicional restante é entregue ao substrato, sendo que esta maior energia resulta em uma maior poça de fusão. E, ainda, o autor constata que os cordões de solda se apresentaram livres de descontinuidades, como trincas e poros.

Com o intuito de avaliar o valor da diluição em depósitos realizados com o processo PTA-P e taxa de alimentação de 9,5 g/min, Silva (2010) obteve valores de diluição iguais a 1,58%, 3,04%, 25,35% e 31,36% para correntes de soldagem de 50, 70, 110 e 150 A, respectivamente. Já ao aumentar a taxa de alimentação para 11,5 g/min o autor obteve valores de diluição de 3,63%, 8,28%, 29,62% e 47,03% para as correntes de soldagem de 70, 110, 150 e 190 A, respectivamente. Segundo Silva (2010) houve a redução da diluição com aumento da taxa de alimentação de pó, ao analisar os resultados com a mesma corrente de soldagem. No entanto, ao analisar os resultados do estudo percebe-se que para a corrente de soldagem de 70 A ocorreu o aumento da diluição com aumento da taxa de alimentação de pó. Uma hipótese para este aumento pode estar associada ao entupimento dos canais de injeção de material da tocha de soldagem o que faria com que menos pó seja injetado no arco e a mais energia seja direcionada para o substrato aumentando, assim, a sua diluição.

Em outro estudo, também com o pó metálico de aço inoxidável 316L, Balasubramanian *et al.* (2009) realizaram experimentos em chapas de aço carbono AISI 1040 e analisaram a geometria do cordão para determinar os limites dos parâmetros de processo para os experimentos. Os autores variaram a corrente de soldagem, velocidade de soldagem, taxa de alimentação do pó, frequência de oscilação da tocha e distância bico-peça. Balasubramanian *et al.* (2009) não comentam exatamente em quais condições de soldagem foram obtidos os seus resultados e tampouco apresentam os valores do impacto dos parâmetros de soldagem analisados na geometria do cordão de solda. Entretanto, os autores afirmam que para correntes de soldagem inferiores a 150 A ocorre falta de fusão nos depósitos e já para corrente acima de 190 A foram observados mordeduras e respingos. Além disso, para velocidade de soldagem acima de 210 mm/min os autores obtiveram a penetração incompleta nos cordões de solda.

Ao analisar a taxa de alimentação de pó, Balasubramanian *et al.* (2009) afirmam que para taxas menores de 20 g/min, ocorre uma penetração excessiva do metal de base e, em casos de taxas superiores a 40 g/min a geometria do cordão de solda não é uniforme pelo excesso de material de adição fundido incompletamente. Para frequência de oscilação da tocha menor que 2 Hz, os cordões obtidos não foram uniforme e muito estreitos. Em relação a DBP, os autores citam que para distâncias menores que 8 mm, o comprimento do arco foi considerado curto e a alimentação em pó inadequada, para distância maior que 12 mm os autores verificaram a instabilidade do arco.

Outra liga muito utilizada pela indústria em aplicações de revestimento consiste nas superligas a base de cobalto. Em relação ao gás de arraste no processo PTA-P, Díaz (2005) analisou o efeito da vazão do gás de arraste na geometria

de depósitos de liga à base de cobalto (Stellite 6), liga muito utilizada pela indústria em aplicações de revestimento, com granulometria entre 45-150 μm , sobre chapas de aço carbono ABNT 1020 com corrente de soldagem de 160A. Díaz (2005) realizou experimentos na posição plana de soldagem com três níveis de vazão de gás (2, 4 e 6 l/min) e observaram que para o maior deles (6 l/min) ocorreu falta de fusão em praticamente 71,00% do cordão de solda. Díaz (2005) também avaliou a morfologia do cordão de solda nas posições de soldagem horizontal e sobre-cabeça empregando vazão de gás de arraste de 2 l/min e corrente contínua pulsada, justificando o emprego desta por permitir o melhor controle da poça de fusão. A corrente de pulso e de base empregadas foi de 200 A e 120 A, respectivamente, com frequência de pulsação de 5 Hz, com tempo de pulso e base iguais a 0,10 s.

Na Figura 2 é apresentado o aspecto superficial dos cordões de solda obtidos por Díaz (2005) nas diferentes posições de soldagem. O autor afirma que o cordão realizado na posição plana apresenta uma diferença na geometria da interface entre o revestimento e o substrato, em relação às outras posições de soldagem. Segundo Díaz (2005) a penetração do cordão de solda está localizada nas laterais e não na região central do perfil do cordão, enquanto que de uma forma geral, a posição de soldagem não afeta significativamente na largura e profundidade da ZAC. Por outro lado, o autor verificou o efeito da posição de soldagem sobre o reforço, sendo o valor deste igual a 3,05 mm na posição plana, 3,50 mm na a posição horizontal e 3,70 mm na sobre-cabeça. Os maiores valores obtidos na posição sobre-cabeça e horizontal, são atribuídos ao efeito da gravidade. Por fim, os depósitos obtidos pelo autor apresentaram bom acabamento superficial, sem a presença de defeitos. Em relação ao efeito da deposição da liga metálica Stellite 6 na diluição, como resultado o autor obteve valores de diluição de 5,8%, 6,4% e 5,5% para as posições de soldagem plana, horizontal e sobre-cabeça, respectivamente. Demonstrando que, a posição de soldagem não afeta significativamente o grau de diluição dos depósitos, porém, o processo PTA-P se mostra robusto uma vez que produz depósitos com valores de diluição relativamente baixos mesmo em posições desfavoráveis. No mesmo trabalho, Díaz (2005) também avaliou a influência da DBP na diluição. Para tanto foram realizados ensaios de soldagem na posição plana com correntes de soldagem de 160, 170 e 180 A. Para DBP de 6 mm, o percentual de diluição foi de, aproximadamente, 18% para as três correntes de soldagem analisadas, enquanto que, para DBP de 10 mm, foi cerca de 13%. Segundo Díaz (2005) os maiores valores de diluição para a DBP menor, são devido aos maiores valores de penetração obtidos. Isso, provavelmente, pois com maior valor de DBP, conseqüentemente, há o maior comprimento do arco principal o que reduz a densidade de corrente e o fluxo de calor direcionado para o substrato.

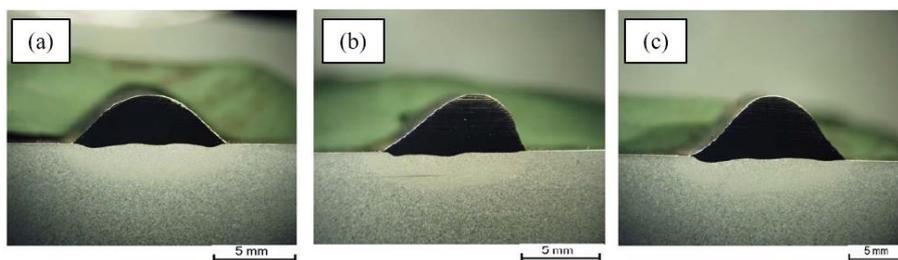


Figura 2. Seção transversal dos cordões de solda obtidos na posição (a) plana, (b) horizontal e (c) sobre-cabeça. Adaptado de Díaz (2005)

Uma classe de liga muito utilizada pela indústria em aplicações de revestimento são as ligas à base de Ni. Uma dessas ligas é a liga Colmonoy 6 que foi depositada sobre chapas de aço carbono AISI 1020 e aço inoxidável AISI 304 por Reinaldo (2008). Este empregou correntes de soldagem de 130 e 170 A e velocidade de soldagem de 5 e 20 cm/min. Como resultado, os cordões realizados sobre o substrato de aço carbono AISI 1020 para 130 A e 170 A de corrente de soldagem e velocidade de soldagem de 20 cm/min apresentaram descontinuidades, como a presença de trincas e respingos, enquanto que aqueles depositados sobre o substrato AISI 304 para as correntes e velocidades de soldagem estudadas não apresentaram trincas ou outros defeitos. Entretanto, as imagens dos cordões de solda apresentadas pelo autor não apresentam claramente as descontinuidades citadas no estudo. De acordo com o autor, as trincas podem ser mitigadas pelo pré-aquecimento do metal de base e os respingos pelo aumento do aporte térmico. Reinaldo (2008) para o substrato de aço carbono AISI 1020 obteve que dimensões como penetração e largura aumentaram 220,00% e 45,80%, respectivamente, com o incremento da corrente de soldagem de 130 a 170 A, diferentemente do valor de reforço que reduziu 7,80%, mantendo-se fixa a velocidade de soldagem igual a 5 cm/min.

Reinaldo (2008) em seu estudo obteve que ao manter a intensidade da corrente de soldagem fixa em 130 A e a velocidade de soldagem alterada de 5 para 20 cm/min, um aumento de 20,00% da penetração e reduções de 40,30% na largura e 51,00% no reforço. Além disso, segundo os resultados obtidos por Reinaldo (2008) ao fixar a velocidade de soldagem em 20 cm/min e aumentar a corrente de soldagem de 130 a 170 A, ocorreu o mesmo comportamento nas dimensões dos cordões de solda que na menor velocidade de soldagem estudada. A penetração e largura aumentaram 195,20% e 17,40%, respectivamente, contudo houve a redução de 12,00% no reforço. Ademais, alterando de 5 para 20 cm/min a velocidade de soldagem e mantendo fixa a corrente de soldagem em 170 A, o autor obteve reduções de 51,90% na largura e 53,20% no reforço do cordão e o aumento de 10,70% na penetração.

Reinaldo (2008) também analisou o efeito da variação na corrente e velocidade de soldagem nos aspectos geométricos dos cordões de solda realizados sobre o substrato de aço inoxidável AISI 304. O autor obteve, ao fixar a velocidade de soldagem em 5 cm/min e aumentar a corrente de soldagem de 130 a 170 A, que a penetração e largura

aumentaram 54,50% e 20,80%, respectivamente, contudo houve uma redução de 11,50% no reforço. Para as mesmas condições de corrente de soldagem e velocidade de soldagem fixa de 20 cm/min o autor obteve aumentos de 57,50% na penetração e 11,90% na largura, entretanto ocorreu a redução de 2,40% no reforço do cordão de solda. Enquanto que, Reinaldo (2008) ao manter fixa a corrente de soldagem em 130 A e alterar a velocidade de soldagem de 5 para 20 cm/min obteve reduções de 44,80%, 53,70% e 26,30% na largura, reforço e penetração, respectivamente. O autor ao aumentar o valor da velocidade de soldagem de 5 para 20 cm/min e utilizar corrente de soldagem de 170 A também obteve a tendência de reduções de 24,80% no valor da penetração e de 48,90% para largura e reforço do cordão de solda.

Além disso, Reinaldo (2008) realizou depósitos com o intuito de compreender os efeitos da composição química do substrato no valor da diluição dos revestimentos (Figura 3). Verifica-se que, ao se manterem fixos os parâmetros do processo, valores significativamente menores de diluição foram obtidos nos substratos de aço carbono AISI 1020. Uma diferença importante entre os dois substratos é que os depósitos realizados no substrato de aço inoxidável AISI 304 apresentam maior área da zona de fusão em relação aos depósitos sobre o aço carbono AISI 1020, visto que a condutividade térmica do aço inoxidável austenítico é um terço a do aço carbono (Reinaldo, 2008), absorvendo mais calor e por isso com um resfriamento mais lento da poça de fusão, o que promove uma maior diluição.

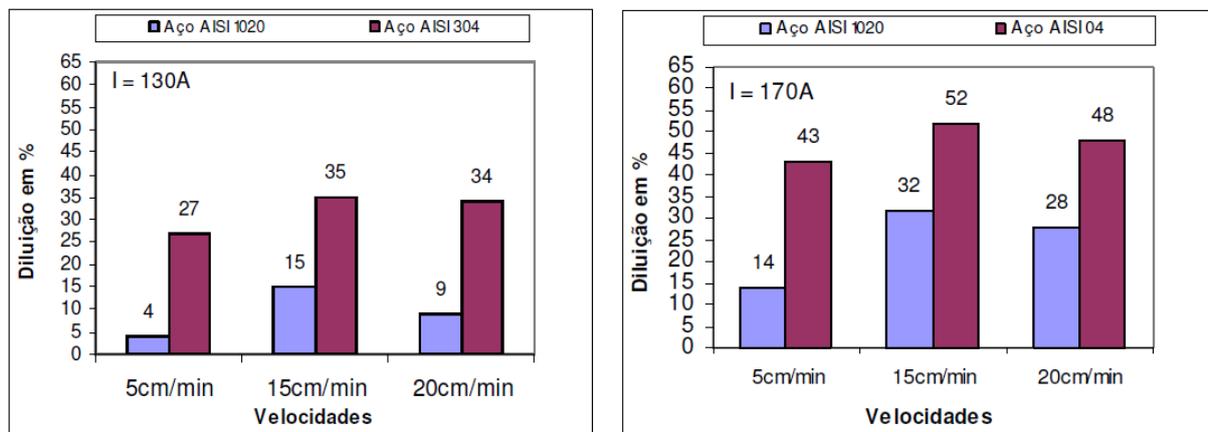


Figura 3. Valores da diluição para as correntes de soldagem de 130 e 170A para os substratos AISI 1020 e AISI 304 em função da velocidade de soldagem (Reinaldo, 2008)

3.1. Manufatura Aditiva

Nos últimos anos, uma tecnologia para fabricação de componentes pela deposição de material em forma de camadas tem sido amplamente estudada. A Manufatura Aditiva (MA) é um processo para a fabricação de componentes pela deposição de material em camadas consecutivas. Neste contexto, aplicações que utilizam processos de soldagem a arco como fonte de calor estão se tornando cada vez mais comuns (Alberti *et al.*, 2016). Visto que, um grande aporte de calor é introduzido no processo MA na busca por altas taxas de deposição, pelo repetitivo aquecimento das camadas de material, resultando no acúmulo de calor e baixa taxa de resfriamento da poça de fusão, a qualidade dos componentes fabricados pode ser afetada, particularmente a microestrutura, bem como propriedades mecânicas (Ke and Xiong, 2020).

A literatura apresenta algumas soluções para minimizar os efeitos da baixa taxa de resfriamento da poça de fusão, como a estratégia de deposição intermitente (Hackenhaar, 2020 e Ke and Xiong, 2020), introduzindo tempos de espera entre a deposição de camadas para resfriar o componente até uma temperatura adequada. Outra solução consiste em aumentar a dissipação de calor do substrato através de um sistema de refrigeração a água (Ke and Xiong, 2020), no entanto, apenas as camadas próximas do substrato podem ser efetivamente resfriadas por esta abordagem. Ademais, a refrigeração para reduzir o acúmulo de calor entre as camadas depositadas poderia ser feita com auxílio de gás (Hackenhaar, 2020 e Ke and Xiong, 2020). Embora, gases como argônio, nitrogênio, hidrogênio e gás carbônico, possam resolver efetivamente a questão do acúmulo de calor, os custos experimentais para a aplicação do resfriamento são altos. Neste contexto, o PTA-P apresenta potencial para aplicação de MA por ser um processo que apresenta um menor aporte térmico que os processos TIG e MIG (Alberti *et al.*, 2016). O sucesso do procedimento de deposição de material em camadas para revestir determinada área superficial depende da seleção correta dos parâmetros de processo (Hackenhaar, 2020), que podem diferir de camada para camada, assim como da composição química do material de adição (Alberti *et al.*, 2016).

Mesmo com o potencial de aplicação do processo PTA-P, foi encontrado apenas um trabalho que aborde este processo na aplicação de MA. Alberti *et al.* (2016), ao utilizar chapas de uma liga a base de Ni endurecida por precipitação como substrato e dois pós metálicos de ligas a base de Ni, um endurecido por precipitação com composição semelhante à do substrato e outro endurecido por solução sólida, analisou o potencial do processo PTA-P na fabricação por MA de uma parede fina (aproximadamente 2 mm de espessura). Foram depositadas cinco camadas ao longo do substrato, sem tempo de espera entre a deposição de material. Nos componentes em que foi depositada a liga

de Ni endurecida por precipitação a corrente de soldagem foi ajustada na faixa de 18 a 26 A, já a velocidade de soldagem na faixa de 78 a 90 mm/min e com a taxa de alimentação de material na faixa de 4,0 a 5,0 g/min. Os parâmetros do processo foram alterados para os depósitos com a liga de Ni endurecida por solução sólida, a corrente de soldagem foi ajustada na faixa de 15 a 26 A, já a velocidade de soldagem na faixa de 78 a 144 mm/min e com a taxa de alimentação de material na faixa de 3,5 a 4,5 g/min. Logo, a alteração dos parâmetros de processo impactaram na redução da energia fornecida pelo arco voltaico para evitar a refusão excessiva da primeira camada de depósito e o aumento na largura das camadas (Alberti *et al.*, 2016). Como resultado, os autores afirmam que os componentes produzidos com ambas as ligas à base de Ni não apresentaram nenhuma descontinuidade, no entanto, a liga endurecida em solução sólida permitiu um componente de menor espessura (2,3 mm) do que a liga endurecida por precipitação (2,8 mm).

4. DESENVOLVIMENTO

Inicialmente será estruturada uma bancada de ensaios de soldagem, atendendo as necessidades específicas para a aplicação do processo PTA-P no que tange a realização do estudo proposto. A bancada de ensaios será composta por uma fonte de soldagem multiprocesso DigiPLUS A7, modelo ACPO3C de corrente alternada, na qual será conectada a uma tocha PTA-P, modelo J21, com injeção externa de pó. Devido ao mecanismo de constrição do arco por um bocal de constrição que é inerente ao processo PTA-P existe a necessidade de uma unidade de refrigeração conectada a tocha para evitar a sua degradação. A tocha de soldagem será acoplada por um punho de fixação num robô de soldagem KUKA, modelo KR 10 R1420, de seis graus de liberdade para o deslocamento da mesma durante a soldagem. Propõe-se a utilização de um robô de soldagem visto que, em etapas futuras do estudo, serão aplicadas camadas de revestimentos em cavidades de moldes de injeção de alumínio que possuem geometrias complexas. Ademais, a bancada de ensaios será composta, por um alimentador de pó, modelo ADP VR-F, responsável pelo armazenamento e dosagem do material de adição que será alimentado durante os ensaios. Além disso, serão necessários dois cilindros de gases com os seus respectivos reguladores de vazão, para alimentar os três circuitos de gases característicos do processo: gás de plasma, gás de arraste ou de transporte e gás de proteção. Visando tornar a execução do processo de soldagem PTA-P mais dinâmica e eficiente, será realizada a integração da bancada de modo que a unidade de comando do robô estará interconectada com a fonte de soldagem para que seja possível, por exemplo, o acionamento do deslocamento da tocha de soldagem acoplada no punho do robô, apenas, após a abertura do arco-piloto e que seja estabelecido o arco principal. Durante a realização dos ensaios será utilizado o sistema de aquisição SAP V4 que será conectado a fonte de soldagem com o objetivo de registrar os dados de tensão e corrente da fonte de soldagem. De posse desses dados será possível obter as medidas de corrente e tensão médias, vazão de gás e cálculo da energia de soldagem de cada ensaio, para posterior análise. A bancada com todos os seus elementos pode ser vista na Figura 4.

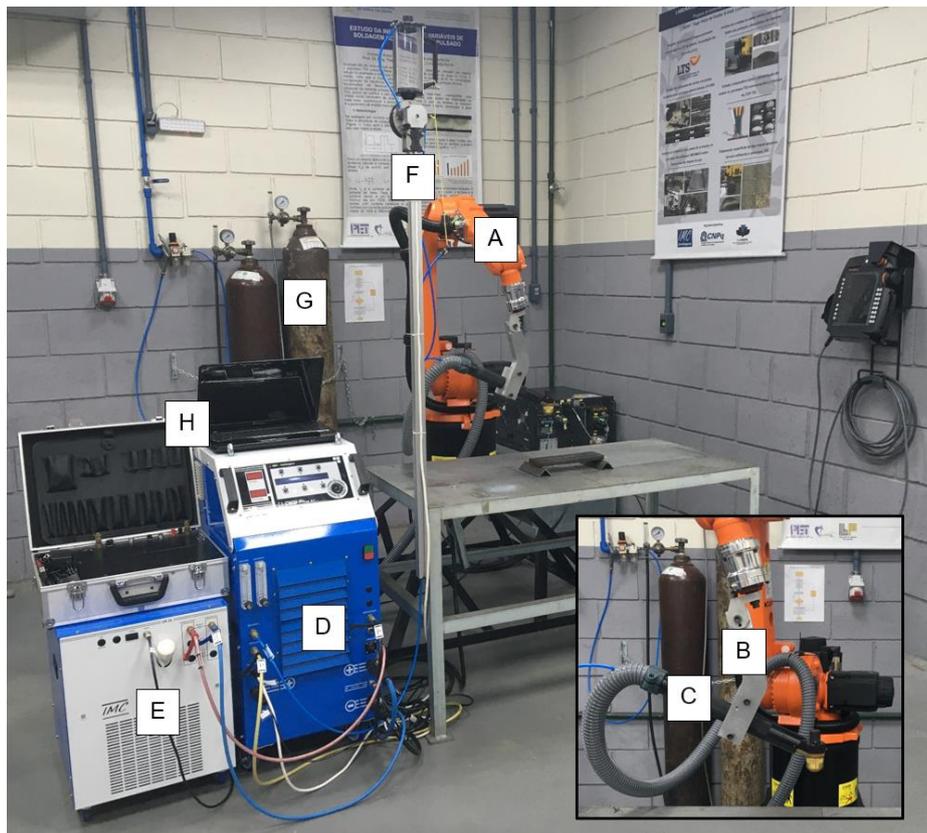


Figura 4. Bancada de ensaios composta por (A) robô de soldagem, (B) punho de fixação, (C) tocha de soldagem, (D) fonte de soldagem, (E) unidade de refrigeração, (F) alimentador de pó, (G) cilindros de gás e (H) sistema de aquisição SAP

Com o intuito de caracterizar a influência dos parâmetros do processo PTA-P na morfologia dos depósitos serão realizados ensaios de soldagem em chapas planas com cordões de solda lineares. Pretende-se variar parâmetros como corrente de soldagem, velocidade de soldagem, vazão do gás de plasma, taxa de alimentação de material de adição, distância bico-peça. Visto que tais fatores possuem influência nas características morfológicas dos depósitos como largura, reforço, molhabilidade, acabamento e, sobretudo, diluição. Logo, são vitais para a qualidade da camada de revestimento e, portanto, impactando nas características microestruturais dos depósitos. Será utilizado como substrato o aço carbono ASTM A36 por tratar-se de um material mais acessível e de menor custo. Almejando compreender o funcionamento do processo PTA-P e de que maneira os seus parâmetros de processo influenciam na qualidade final do depósito, o material de adição será o aço inoxidável austenítico AISI 316L. Este foi escolhido por ser um material de fácil aquisição na forma de pó para aplicações de revestimento com o processo PTA-P e, relativamente, de baixo custo. Somando-se a esses fatores, a escolha do aço inoxidável AISI 316L como material de adição, deve-se ao fato de que este material pode se constituir em uma solução, no futuro, para uma possível demanda por camada de amantecimento para o revestimento das cavidades dos moldes de injeção de alumínio.

Num segundo momento, já familiarizado com o funcionamento do processo PTA-P e com a influência dos parâmetros de soldagem avaliados anteriormente para a realização de um depósito com bom acabamento superficial, baixo valor de penetração e diluição, além de maior largura. Serão realizados ensaios de soldagem com outra liga metálica em que serão fixados alguns parâmetros de soldagem, tal como a vazão do gás de plasma e a distância bico-peça, enquanto a influência na morfologia do cordão de solda de outros parâmetros do processo será avaliada, como corrente e velocidade de soldagem e taxa de alimentação do material de adição. A liga usada nesta etapa do trabalho deverá ser uma liga comercial, como as ligas a base de cobalto que deverá ser resistente ao desgaste e fadiga térmica devido a sua futura aplicação em moldes de injeção de alumínio sob pressão. Pretende-se realizar a deposição da liga comercial na forma de pó sobre substrato de aço H13, através da realização de cordões lineares. O aço H13 está sendo considerado no presente estudo por ser um dos materiais mais utilizados e, comercialmente difundido na indústria, para a fabricação dos moldes de injeção.

Após o entendimento dos efeitos das variáveis do processo PTA-P sobre os aspectos morfológicos dos depósitos pela deposição da liga comercial no substrato do aço H13, torna-se possível a caracterização da quantidade de camadas necessárias para a aplicação de revestimento. Ainda em ensaios em chapas planas e com depósitos lineares, esta etapa do estudo consistirá em avaliar a quantidade de camadas necessárias para conferir aos depósitos as características conforme os requisitos definidos no estudo. Portanto, os depósitos serão analisados do ponto de vista metalúrgico, em que será considerada a análise da microestrutura através da microscopia óptica e MEV dos revestimentos realizados. E,

ainda, serão analisadas as propriedades mecânicas, como a microdureza dos revestimentos. Além disso, serão analisadas a composição química dos pós-óxidos a fim de determinar a diluição do revestimento.

Por fim, serão avaliadas diferentes estratégias de deposição visando recobrir uma dada área superficial. Pretende-se avaliar estratégias como cordões lineares depositados lateralmente, cordão em espiral e, eventualmente, cordões intercalados. Ademais, considerando os resultados das etapas anteriores, como por exemplo, a eventual necessidade de uma camada de amateigamento no revestimento final. Embora esta etapa ainda seja realizada em chapas planas, esta se faz necessária a fim de avaliar o efeito que um cordão de solda depositado previamente exerce sobre a morfologia e, principalmente, sobre a diluição do material sendo depositado em sua adjacência. Portanto, a partir destes resultados será possível definir procedimentos de soldagem que deverão ser aplicados em etapas futuras do estudo, vislumbrando a aplicação destes procedimentos em cavidades de injeção de alumínio com o objetivo de revestir essas superfícies e maximizar a vida útil destas ferramentas, assim como a redução dos custos para sua fabricação.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O crescente uso do alumínio em componentes injetados principalmente na indústria automotiva faz com que seja necessária a melhoria do processo e consequentemente o aumento da vida útil dos moldes de injeção. Dentro do setor ferramenteiro na indústria automotiva nacional nota-se a necessidade pelo estudo e desenvolvimento de novas técnicas que visam melhorias nas propriedades de resistência ao desgaste e à fadiga térmica, visto que estes são significativos mecanismos de falhas associados aos ciclos de injeção em moldes de injeção de alumínio em alta pressão. Portanto, vislumbra-se, com o sucesso da aplicação do processo PTA-P no revestimento superficial das cavidades de moldes de injeção de alumínio, uma alternativa potencialmente viável na obtenção de moldes mais eficientes, dotados de características superiores no que se refere a sua vida útil e com menor custo.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Pós-ECM, ao Programa Rota 2030 “Ferramentarias Brasileiras Mais Competitivas” e a Fundep, pelo apoio financeiro com o fornecimento da bolsa de pós-graduação. Agradecem também ao Laboratório de Tecnologia da Soldagem (UFSC-Joinville) pelo auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

7. REFERÊNCIAS

- Alberti, E.A. *et al.*, 2016. “Additive manufacturing using plasma transferred arc”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 83, No. 9-12, pp. 1861-1871. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-015-7697-7>
- Amorim, F.L., 2002. *Tecnologia de eletroerosão por penetração da liga de alumínio AMP 8000 e da liga de cobre CuBe para ferramentas de moldagem de materiais plásticos*. Tese (Doutorado), Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Balasubramanian, V. *et al.*, 2009. “Application of Response Surface Methodology to Prediction of Dilution in Plasma Transferred Arc Hardfacing of Stainless Steel on Carbon Steel”. *Journal of Iron and Steel Research International*, Vol. 16, No. 1, pp.44-53. [http://dx.doi.org/10.1016/S1006-706X\(09\)60009-1](http://dx.doi.org/10.1016/S1006-706X(09)60009-1)
- Concer, D., 2011. *Previsão de fadiga térmica de matrizes para injeção de alumínio sob pressão utilizando a equação de Basquin e elementos finitos*. Dissertação (Mestrado), Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.
- Díaz, V.M.V., 2005. *Inovação do equipamento e a avaliação do processo plasma de arco transferido alimentado com pó (PTAP) para soldagem fora de posição*. Tese (Doutorado), Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- FUNDEP, 2021. *Linha IV - Ferramentarias Brasileiras mais Competitivas - Rota 2030 | Fundep*. Disponível em: <<https://rota2030.fundep.ufmg.br/linha4/>> Acesso em: 21 set. 2021.
- Gallo, S.C. *et al.*, 2011. “Nucleação de trincas em moldes de injeção de alumínio com tratamento de superfícies duplex”. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, Vol. 8, No. 3, pp. 153-159.
- Gonçalves, C. S., 2012. *Efeito do Processo de Nitretação sob Plasma no Comportamento em Fadiga Térmica dos Aços Ferramenta para Moldes para Injeção de Alumínio sob Pressão*. Dissertação (Mestrado), Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Hackenhaar, W., 2020. *Estudo das propriedades mecânicas e do resfriamento em manufatura aditiva por deposição a arco*. Tese (Doutorado), Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- IAL - Internacional Aluminium, 2019. “Assessment of Aluminium Usage in China’s Automobile Industry 2016~2030” disponível em: <<https://international-aluminium.org/wp-content/uploads/2019/02/Report.pdf> >
- Ke, Y. and Xiong, J., 2020. “Microstructure and mechanical properties of double-wire feed GTA additive manufactured 308L stainless steel”. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 26, No. 9, pp. 1503-1513. <http://dx.doi.org/10.1108/RPJ-09-2019-0238>
- Lakshminarayanan, A.K. *et al.*, 2008. “Predicting the dilution of plasma transferred arc hardfacing of stellite on carbon steel using response surface methodology”. *Metals and Materials International*, Vol. 14, No. 6, pp. 779-789.

<http://dx.doi.org/10.3365/met.mat.2008.12.779>

- Lin, J. *et al.*, 2006. "Design methodology for optimized die coatings: The case for aluminum pressure die-casting". *Surface & Coatings Technology*, Vol. 201, No. 6, pp. 2930-2941.
- Mordor, 2022. High Pressure Die Casting Market – Growth, Trends, Covid-19 Impact, and Forecasts (2022 - 2027). disponível em: <<https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/high-pressure-die-casting-market>>.
- Reinaldo, P. R., 2008. *Influência dos parâmetros de processamento por PTA e do substrato, na resistência ao desgaste de um revestimento a base de Ni*. Dissertação (Mestrado), Pós-Graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.
- Rota 2030, 2021. *O que é Rota 2030?* Disponível em: <<https://www.rota2030.com.br/rota-2030-inovacao/>> Acesso em: 21 set. 2021.
- Silva, R.H.G.E., 2010. *Inovações em equipamentos e em parametrização no processo de revestimento por plasma-pó (PTA-P)*. Tese (Doutorado), Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Tigrinho, J.J., 2005. *Superfícies enriquecidas por carbonetos de tungstênio depositados a plasma por arco transferido*. Dissertação (Mestrado), Pós-Graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.
- Vendramim, J., 2021. *Molde para fundição de alumínio sob pressão*. Disponível em: <<https://www.revistaferramental.com.br/?cod=artigo/molde-para-fundicao-de-aluminio-sob-pressao/>> Acesso em: 12 set. 2021.

USAGE OF THE PTA-P PROCESS IN THE COATING OF ALUMINUM INJECTION MOLDS: FUNDAMENTALS AND PERSPECTIVES

Kamila Borba Silva, kamila.borba@posgrad.ufsc.br¹
Tiago Vieira da Cunha, t.cunha@ufsc.br¹
Carlos Maurício Sacchelli, carlos.sacchelli@gmail.com¹

¹ Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville, SC, Brazil

Abstract. *The application of high pressure injected aluminum parts is a technology increasingly used in the automotive sector due to the constant search for the manufacture of low weight components. In this context, aluminum injection molds are constantly exposed to repetitive compression, traction and bending stresses, suffering wear and thermal fatigue, which affect the quality of the injected component and can result in its failure. Therefore, it is vital to develop new technologies aiming at improving the lifetime of aluminum injection tools and seeking better performance in service. In this context, as part of a Federal Government strategy to expand the global insertion of the Brazilian automotive industry, the Rota Program 2030 was created. Within the scope of Rota Program 2030, there is a project entitled "Improvement in the design of aluminum injection tools", coordinated by the Federal University of Santa Catarina (UFSC) in partnership with other Science and Technology Institutes (STIs) to seek an improvement in the wear resistance and thermal fatigue properties of aluminum injection molds. Within this scenario, one of the alternatives in which there is great potential for improving the lifetime of tools is the use of coatings by welding. In this context, the plasma transferred arc with powder as filler material (PTA-P) has considerable prominence, due to the ability to make deposits with low dilution value and good surface finish. Considering the potential of application of this technique, the present work aims to prospect the PTA-P process in the study of coatings in cavities and inserts of aluminum injection molds. Therefore, a methodology will be used in order to characterize the influence of PTA-P process parameters such as welding current, welding speed, plasma gas flow, powder feed rate and nozzle-piece distance on deposit morphology, such as width, reinforcement, dilution, wettability and discontinuities. In addition, the number of layers needed and different strategies of material deposition will be evaluated in order to cover a certain surface area to give the coating characteristics according to the defined requirements. Therefore, the application of PTA-P is envisaged as a potentially viable alternative to obtain more efficient aluminum injection molds, endowed with superior characteristics in terms of their lifetime and at a lower cost.*

Keywords: Aluminum injection molds, Rota Program 2030, PTA-P, Coating, Dilution

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.