



USO DA MANUFATURA ADITIVA POR FUSÃO LOCALIZADA NA RECUPERAÇÃO DE ESTAMPO PARA INDÚSTRIA CERÂMICA

Ramon José¹
Carlos Antônio Ferreira²
Gilson De March³
Daniel Fritzen⁴
Anderson Daleffe⁵
Lirio Schaeffer⁶

RESUMO: Dentre os processos de Manufatura Aditiva (MA) a técnica de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) é aplicada nas operações de reparo de peças e componentes metálicos. É uma tecnologia baseada na fusão, conhecida por sua alta taxa de deposição, baixo desperdício de matéria-prima, o que torna um processo de fabricação econômico, podendo ser empregado em peças de médio e grande porte. Uma das grandes diretrizes do MADA é o reparo de peças provenientes dos processos produtivos. No setor cerâmico, na etapa de prensagem do porcelanato ocorre o desgaste prematuro nas lastrinas que revestem a cavidade da caixa matriz, esse desgaste está associado ao uso de massa (pó atomizado) altamente abrasivo devido ao teor de matérias-primas de natureza feldspáticas. Este estudo tem como objetivo principal comparar duas condições diferentes de trajetória de deposição do revestimento duro em arame tubular UTP AF Dur 600 via processo MADA em corpos de prova com substrato base fabricado em aço SAE 1045. A análise de desgaste dos corpos de prova foi realizada por meio do ensaio em abrasômetro roda de borracha em areia seca seguindo a norma ASTM G65, efetuando um comparativo quanto a resistência a abrasão. Desta forma, este trabalho consolida-se com uma revisão do estado da arte da Manufatura Aditiva por Deposição a Arco, aprimorado com os conceitos do objeto de estudo, avaliando a sua resistência ao desgaste abrasivo com base no plano de trajetória de deposição.

Palavras-chave: Manufatura aditiva por deposição a arco, desgaste abrasivo, revestimento UTP AF Dur 600

1. INTRODUÇÃO

Entre todos os produtos fabricados no setor cerâmico o porcelanato técnico lidera como produto com maior avanço tecnológico, pois envolve alta tecnologia com aplicação de matérias-primas de alta qualidade e parâmetros operacionais de extrema

¹ Mestrando profissional – PPGEM-UniSatc: joseramon10@hotmail.com

² Mestrando – PPGEM-UniSatc: carlos.ferreira@satc.edu.br

³ Mestrando – PPGEM-UniSatc: gilson.march@satc.edu.br

⁴ Professor – PPGEM-UniSatc: daniel.fritzen@satc.edu.br

⁵ Professor – PPGEM-UniSatc: anderson.daleffe@satc.edu.br

⁶ Professor – PPGEM / LdTM UFRGS: schaefer@ufrgs.br



relevância, tais como: pressão de conformação entre 35-45 MPa e uma temperatura de queima aproximadamente de 1200°C [1].

No processo de fabricação de produtos cerâmicos o porcelanato técnico exige várias etapas, onde, na etapa de prensagem em prensas hidráulicas, se faz necessário o uso de matrizes que conferem a forma geométrica exata do produto cerâmico. A cavidade da matriz é preenchida com pó atomizado (massa) que tem em sua formulação concentração de matérias-primas de natureza feldspáticas, que por sua vez, é altamente abrasiva. A abrasividade acelera o desgaste nas caixas matriz inferior, que possui duas partes principais: a caixa matriz, que tem formato retangular e são fabricadas em aço 1045 e a cavidade, que tem o formato da bitola do revestimento cerâmico, esta cavidade é revestida pelas lastrinas que são fabricadas com aço ferramenta AISI D6 [2].

O aço AISI D6 utilizado na fabricação das lastrinas é padrão e o provável desgaste está associada com a abrasividade do pó atomizado. Por conta dessa condição, a recuperação das lastrinas por meio da Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) mostra-se um processo viável.

Desta forma, esta pesquisa visa comparar a influência de duas trajetórias diferentes de deposição do revestimento duro em arame tubular UTP AF Dur 600 via processo MADA, em corpos de prova com substrato base fabricado em aço SAE 1045. A análise de desgaste dos corpos de prova será por meio do ensaio em abrasômetro roda de borracha em areia seca, conforme a norma ASTM G65, além dos ensaios de rugosidade superficial, dureza Vickers e metalografia do corpo de prova.

2. MANUFATURA ADITIVA

O processo de fabricação de manufatura aditiva é definido por adicionar e unir materiais em camadas para obter peças com base em desenhos tridimensionais (3D) auxiliado por computadores (CAD), tecnologia que difere das metodologias convencionais de fabricação subtrativa e formativa [3].

2.1 MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO (MADA)

A MADA é uma tecnologia MA baseada na fusão e conhecida por sua alta taxa de deposição, baixo desperdício de material, é um processo de fabricação



econômico indicado para o reparo e/ou fabricação de componentes metálicos de médio a grande porte [4].

A técnica MADA se beneficia de um braço robótico controlado por computador, uma fonte de energia de soldagem, uma tocha de soldagem e um sistema de alimentação de arame para fabricar peças metálicas aditivamente na forma de cordões de solda sobrepostos em camadas previamente depositadas [5], [6].

A entrada excessiva de energia, a alta taxa de deposição e o elevado gradiente de temperatura aplicados durante o processo de MA alimentado por matéria-prima na forma de fio/arame, contribuem para formação de tensões residuais e distorções, portanto, nos processos de soldagem da manufatura aditiva por deposição a arco, vários parâmetros devem ser pautados, tais como: tensão do arco, corrente de soldagem, velocidade de deslocamento, taxa de alimentação de arame, distância de trabalho e estratégia de deposição ou planejamento e direcionamento de deposição [7].

O processo MIG/MAG (*Metal Inert Gas /Metal Active Gas*) é uma das energias de soldagem utilizada como fonte de calor usada no processo MADA [8].

2.2 PROCESSO MIG/MAG

No processo MIG/MAG o fio ou arame é utilizado como um eletrodo consumível, onde, o arco gerado entre o fio e a peça de trabalho funde o fio consumível e deposita o material fundido na superfície do substrato. O processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) consiste em gás inerte metálico (MIG) e gás ativo metálico (MAG). No processo MIG, um gás não reativo (inerte), é usado, como o hélio ou argônio, aplicando-se principalmente para metais não ferrosos. Para o processo MAG é utilizado dióxido de carbono ou uma mistura de gases inertes, ou seja, um tri mix de Ar + CO₂ + O₂, para fins de blindagem. Sua aplicação se dá principalmente para metais ferrosos [9].

Para realização da pesquisa os corpos de prova foram fabricados em aço SAE 1045 na Tabela 1 está descrito o percentual de cada elemento químico presente.



Tabela 1: Composição química SAE-J403-14-1045 [10].

Composição química	Percentual (%)
Carbono	0,470
Silício	0,240
Manganês	0,610
Fosforo	0,011
Enxofre	0,003
Alumínio	0,027
Cromo	0,010

O material utilizado para revestimento dos corpos de prova via processo MADA foi o arame tubular UTP AF Dur 600, esse material é indicado para revestimento de componentes sujeitos à compressão, fricção e impacto, como as mandíbulas de britador, ferramentas de corte e a recuperação de matrizes na fabricação de azulejos [11]. Na Tabela 2 está descrito o percentual de cada elemento químico presente no arame tubular UTP AF Dur 600, na Tabela 3 podemos observar os parâmetros operacionais.

Tabela 2: Composição química do revestimento duro em arame tubular UTP AF Dur 600 (DIN 8555 MF 6-GF-60) [11].

Composição química	Percentual (%)
Carbono	0,600
Silício	1,200
Manganês	1,300
Cromo	6,700
Molibdênio	0,650
Titânio	0,030

Tabela 3: Parâmetros operacionais do revestimento duro em arame tubular UTP AF Dur 600 [11].

Parâmetros	UTP AF DUR 600
Diâmetro arame	12 mm
Voltagem	25 – 34 (V)
Corrente	150 – 300 (A)
Dureza	55 – 60 HRC
Gás de proteção	100% CO ₂ ou Argônio + 25% CO ₂
Peso	15 Kg

2.3 DESGASTE

A norma DIN 50320 de 1979 define desgaste como a perda progressiva de material da superfície de um corpo sólido devido à ação mecânica, isto é, o contato e movimento relativo de um corpo sólido contra um corpo sólido, líquido ou gasoso.



Dentre os processos de desgastes o classificado por abrasão é o que será pautado no estudo em questão [12]. O desgaste abrasivo pode ocorrer de duas formas: abrasão a dois corpos e abrasão a três corpos. No desgaste abrasivo a dois corpos, ocorre quando há um movimento de deslizamento, se caracteriza por ser uma superfície dura e rugosa. No desgaste abrasivo a três corpos, ocorre um deslizamento e rolamento de partículas que podem ser duras e abrasivas [13].

A norma ASTM G65 - Ensaio de abrasão usando Areia Seca em Roda de Borracha define os procedimentos, métodos, condições, tipos de areia abrasiva e construção do equipamento. Este ensaio tem como objetivo determinar a resistência ao desgaste abrasivo em materiais metálicos e não metálicos. O resultado do teste é demonstrado em perda de volume [14].

2.4 MATRIZ PARA INDÚSTRIA CERÂMICA

No processo cerâmico o setor de modelagem corresponde à compactação da matéria prima em uma placa de material cerâmico, essa prensagem é efetuada nas prensas hidráulicas que se faz necessário o uso de estampos que garantem uma forma geométrica exata [15]. Na etapa de prensagem do porcelanato ocorre o desgaste prematuro nas lastrinas que revestem a cavidade da caixa matriz, esse desgaste está associado ao uso de massa (pó atomizado) altamente abrasivo devido ao teor de matérias-primas de natureza feldspáticas [16]. Na Figura 1 está ilustrado um estampo penetrante completo, neste tipo de estamparia, o punção superior avança no interior da cavidade da caixa matriz que se encontra rígida. Possui fácil operacionalidade, adapta-se facilmente com diversos tipos de massas e sua manutenção é simples, este conceito é atualmente o mais utilizado na indústria cerâmica [17], [18].



Figura 1: Estampo penetrante completo [18].

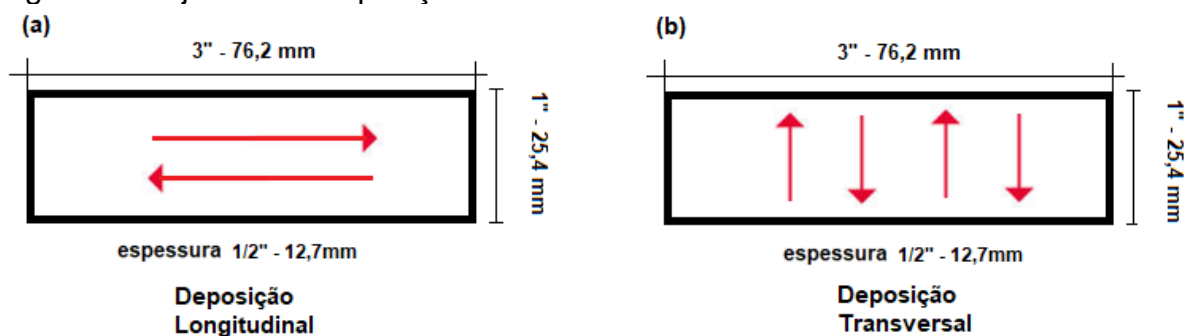
3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção serão descritas as etapas de realização dos experimentos necessários para a validação desta pesquisa, ordenados pelo ensaio de desgaste, análise de rugosidade superficial, análise de dureza Vickers e metalografia dos experimentos ensaiados.

3.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Para esta investigação, foram preparados 06 (seis) corpos de prova medindo 3"x1"x1/2", conforme norma ASTM G65-16, divididos igualmente em 02 (dois) grupos diferentes, conforme a trajetória de deposição do revestimento duro, sendo um grupo no sentido longitudinal e o outro no sentido transversal dos corpos de prova, conforme Figura 2.

Figura 2: Trajetória de deposição do revestimento duro.



Fonte: Do autor.

A confecção dos corpos de prova se deu com a deposição em arame tubular UTP AF Dur 600, em substratos base de SAE 1045, por meio do processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco. Para esta etapa, foi usado um braço robótico marca Yaskawa modelo YRC 1000 AR 1440 conforme ilustrado na

Figura 3, munido da máquina de solda semiautomática da marca Lincoln Electric modelo Power Wave-E500. A programação dos movimentos robóticos se deu por meio software Motoman Linguagem C.

Figura 3: Trajetória Braço robótico marca Yaskawa modelo YRC 1000 AR 1440.



Fonte: Do autor.

Com os parâmetros operacionais estabelecidos o braço robótico executou os movimentos nos três eixos (X, Y e Z), incluindo o controle de movimentação da tocha que é responsável por fazer a deposição do material, camada a camada. A velocidade de avanço da máquina foi de 11 mm/s e a altura da tocha para cada camada foi de 10 mm. Para deposição do material duro sobre o substrato, foi preciso definir os parâmetros ideais do processo de deposição a arco, especificado na Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros operacionais para deposição, braço robótico marca Yaskawa modelo YRC 1000 AR 1440

Parâmetros Operacionais	Unidades
Voltagem	20 (V)
Fluxo de gás	15 l/min
Velocidade de deposição	2032 mm/min
Gás de proteção	75% Argon + 25% CO ₂

Após a fabricação dos corpos de prova via MADA, foram retificados em uma retificadora plana de precisão Mello, P36, conforme demonstrado na Figura 4.

Figura 4: Corpos de prova retificados



Fonte: Do autor.

Em seguida foi efetuado a limpeza com álcool etílico 99,5%, com a finalidade de remover impurezas, gordura etc. Este procedimento de limpeza realizou-se nos corpos de prova para verificação de massa inicial, massa final após o ensaio de desgaste e para execução dos ensaios de rugosidade superficial, micro dureza e metalografia.

3.2 ENSAIO DE RUGOSIDADE

A análise de rugosidade superficial (Rz) foi realizada com um Rugosímetro, modelo Mitutoyo SJ-310. Esta análise se faz necessária, pois, para a realização do ensaio de desgaste, segundo a norma ASTM G65-16, se admite o valor de rugosidade máxima (Rz) na ordem de 0,8µm. Finalizando essa etapa, submetendo as amostras a sua massa inicial na balança analítica marca Marte modelo AUX 320.

3.3 ENSAIO DE MICRODUREZA

Para aferir a micro dureza do material base SAE 1045 e da camada do metal duro em arame tubular UTP AF Dur 600 foi utilizado um microdurômetro Shimadzu HMV-2TADW – dureza Vickers com carga de 9,807 N e com tempo de penetração de 10 segundos.

3.4 METALOGRAFIA

Para verificação da microestrutura do material foi efetuado análise metalográfica usando o microscópio Olympus modelo SC 30 – BX51M. O ensaio metalográfico foi realizado seguindo a norma ABNT NBR 15454. O ataque na parte do substrato de SAE 1045 foi feito com nital 2% por 5 segundos, enquanto na camada depositada de metal duro o ataque químico foi feito com ácido villela por 10 segundos.

3.5 ENSAIO DE DESGASTE ABRASIVO

No laboratório de Desgaste de Superfície – LDS – SATC, foram executados os ensaios de desgaste em roda de borracha em areia seca, conforme

Figura 5: Equipamento abrasômetro LDS-SATC

Figura 5: Equipamento abrasômetro LDS-SATC



Fonte: Do autor.

Com base na norma ASTM G65-16 foi utilizado o procedimento “A” indicado para condições severas de classificação de materiais de média e elevada resistência a abrasão. Para execução os parâmetros de teste foram: força normal 130N, rotação



da roda de borracha 200 rpm, vazão da areia 300 g/min, tipo de areia NBR 7214 N°. 100 e duração do ensaio 6089 rotações. No total de seis corpos de prova foram ensaiados.

Foram ensaiados 6 corpos de prova divididos em dois grupos de acordo com os planos de trajetória de deposição. A identificação de cada grupo seguiu a seguinte forma: amostras 1,2 e 3 com deposição longitudinal e amostras 4,5 e 6 com deposição transversal. Em sequência realizou-se o procedimento de limpeza de todas as amostras ensaiadas no abrasômetro, enfim, encaminhou-se as seis amostras para coletar os valores de massa final em balança analítica marca Marte modelo AUX 320 com precisão de quatro casas após a vírgula.

O resultado do teste é expresso em perda de volume, e calculado conforme equação 1.

$$Vp = \frac{mi-mf}{D} \times 1000 \quad (1)$$

Onde:

Vp = volume perdido (mm³);

mi = massa inicial (g);

mf = massa final (g);

D = densidade do material (g/cm³)

4. RESULTA E DISCUSSÃO

Neste tópico irá se apresentar e comparar os dados coletados em laboratório com relação as duas condições testadas, e dessa forma avaliar a resistência ao desgaste abrasivo com base no plano de trajetória de deposição.

4.1 ENSAIO DE RUGOSIDADE

Para cumprimento da norma ASTM G65 se fez necessário a execução do ensaio de rugosidade, os valores obtidos em ambos os planos de deposição



apresentam valores menores a 0,8 μm , ou seja, a rugosidade obtida nas amostras está abaixo do valor estabelecido pela referida norma. Nas Tabela 5 e Tabela 6 estão apresentados os valores médios coletados em cada amostra.

Tabela 5: Resultados da análise de rugosidade superficial nos corpos de prova com deposição longitudinal.

Corpo de prova	Aferição longitudinal [μm]	Aferição transversal [μm]
1°	0,343	0,720
2°	0,293	0,707
3°	0,275	0,688
Média	0,304	0,705
Desvio Padrão	0,035	0,016

Tabela 6: Resultados da análise de rugosidade superficial nos corpos de prova com deposição transversal.

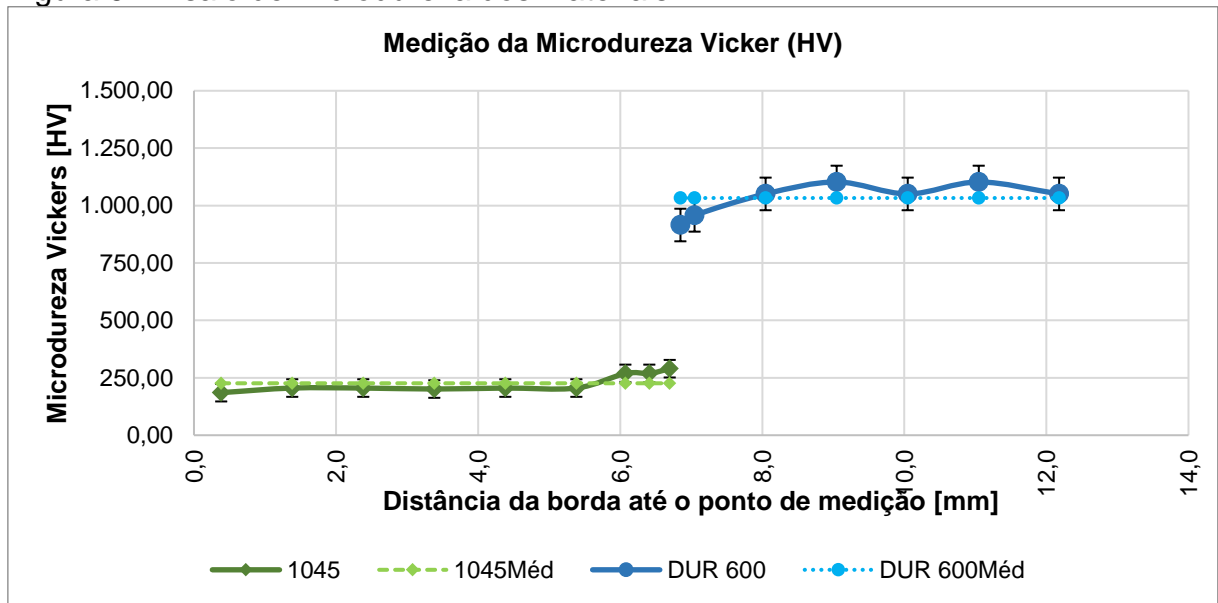
Corpo de prova	Aferição longitudinal [μm]	Aferição transversal [μm]
1°	0,266	0,635
2°	0,227	0,630
3°	0,251	0,645
Média	0,248	0,637
Desvio Padrão	0,020	0,008

4.2. ENSAIO DE MICRODUREZA

Na Figura 7, podemos observar os resultados do ensaio de microdureza que evidenciaram uma grande diferença entre os dois materiais das amostras. A região do substrato em aço SAE 1045 atingiu a microdureza média de 226,2 HV, enquanto a dureza do material duro depositado via MADA atingiu a microdureza média de 1.032,9 HV, sendo 457% mais duro que o substrato base. Desvio padrão de 38,3 HV e 71,0 HV, respectivamente.

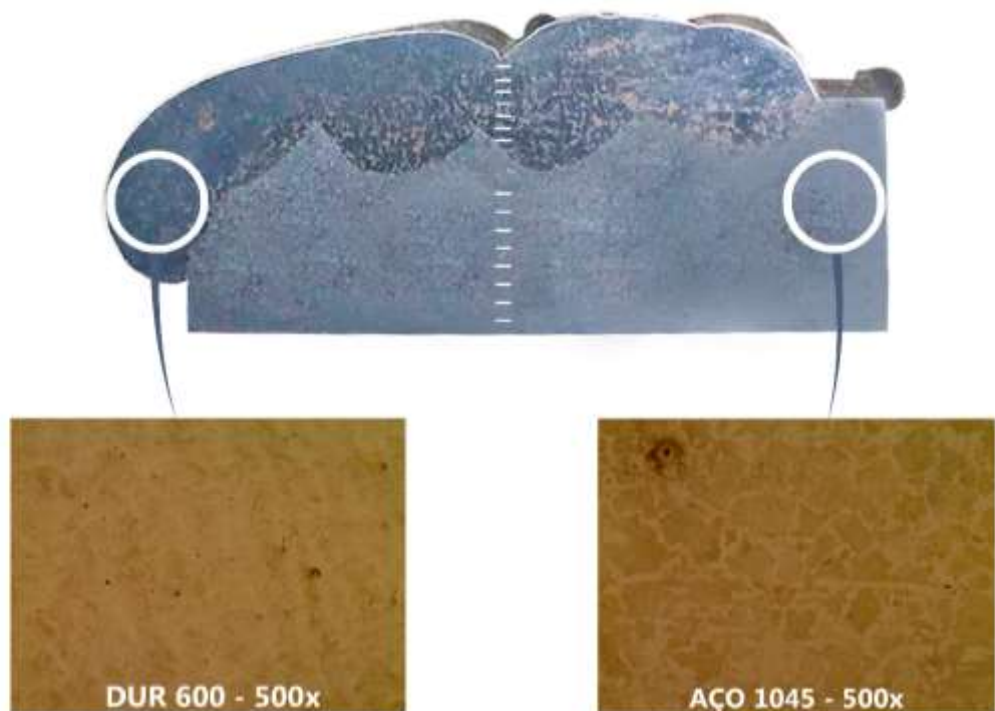
Já na Figura 7 é possível verificar a representação das micrografias do metal base aço SAE 1045 ampliado 500x, onde é possível identificar sua microestrutura nas partes claras, correspondendo a ferrita e as escuras que correspondem a perlita. A perlita é mais dura e resistente que a ferrita, porém mais dúctil que a cementita.

Figura 6: Ensaio de microdureza dos materiais.



Fonte: Do autor.

Figura 7: Ensaio de micrografia dos materiais.

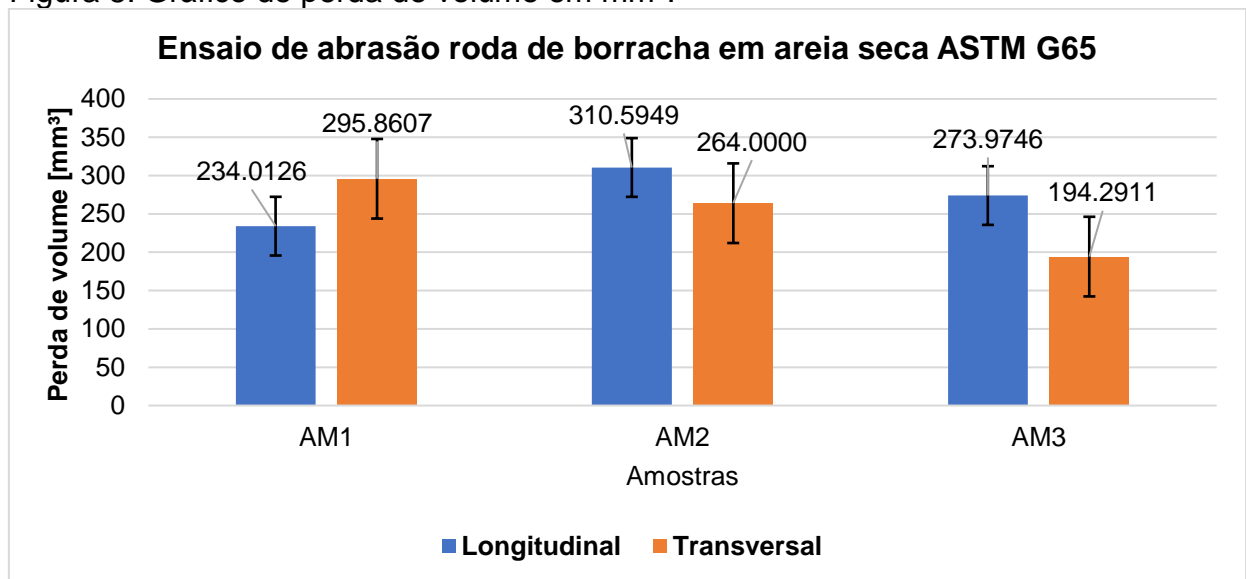


Fonte: Do autor.

4.2 ENSAIO DE DESGASTE RODA DE BORRACHA EM AREIA SECA NORMA ASTM G65

De acordo com a norma ASTM G65, os dados obtidos de perda de massa nos ensaios de desgaste em abrasômetro foram convertidos em perda de volume conforme equação 1. A Figura 8 apresenta os resultados de perda de volume do grupo de amostras com a deposição nos sentidos longitudinal e transversal.

Figura 8: Gráfico de perda de volume em mm^3 .



Fonte: Do autor.

Conforme os resultados apresentados no gráfico, é possível observar que as amostras do grupo com deposição longitudinal obtiveram valores médios de perda de volume em $272,8607 \text{ mm}^3$, cerca de 7,87% maior que a perda de volume identificada nas amostras com deposição transversal, que apresentaram $251,3839 \text{ mm}^3$ de valor médio. Todavia, para o conjunto de amostras de ambos os tipos de corpos de prova, o desvio padrão dos valores médios foi de $38,3033 \text{ mm}^3$ e $51,9468 \text{ mm}^3$, respectivamente.

A perda de volume está associada ao plano de deposição do metal duro, no caso do grupo com deposição transversal, o revestimento duro depositado por manufatura aditiva sobre a base dos corpos de prova quando fixados no equipamento de abrasômetro, se comportaram perpendicular ao plano de rotação da roda de borracha durante todo o período de execução do ensaio, tendo como resultado maior resistência a abrasão. Em contrapartida, os corpos de prova com deposição



longitudinal quando fixados no equipamento de abrasômetro, se comportaram paralelamente ao plano de rotação da roda de borracha o que favoreceu em maior perda de volume em mm³ após execução do proposto ensaio.

5. CONCLUSÃO

Conclui-se que a técnica de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) é um processo de deposição rápido e eficiente se caracteriza por ter uma boa união e uniformidade entre os cordões depositados, também se observou que a microdureza Vickers se permaneceu constante em cada região analisada.

Com o ensaio em roda da borracha em areia seca conforme a norma ASTM G65, verificou-se a eficiência da trajetória de deposição do material duro DUR600 via processo MADA, as amostras do grupo com deposição longitudinal obtiveram 7,87% maior perda de volume que as amostras com a deposição transversal.

A alteração na trajetória de deposição é uma grande ferramenta que pode ser aplicado no processo de recuperação das lastrinas para se obter maior resistência ao desgaste abrasivo, beneficiando a indústria cerâmica.

O controle dos parâmetros operacionais é de extrema importância para se obter deposições uniformes e homogêneas, portanto, o método MADA é uma técnica que está sendo cada vez mais difundida no âmbito laboratorial e no processo fabril das empresas.

REFERÊNCIAS

1. BIFFI, G. O Grês porcelanto. **manual de fabricação e técnicas de emprego**, 2002. 262.
2. METALS, V. <https://www.villaresmetals.com.br/villares/pt/Produtos/Acos-Ferramenta/Trabalho-a-frio/VC131>. **villaresmetals**, 12 Setembro 2023. ISSN 1. Disponível em: <www.villaresmetals.com.br/villares/pt/Produtos/Acos-Ferramenta/Trabalho-a-frio/VC131>. Acesso em: 12 Setembro 2023.
3. 52900-15, I. **Standard terminology for additive manufacturing technologies - general principles - terminology**. **ASTM International, West Conshohocken**. [S.l.]. 2015.



4. LEI, Y. et al. Integration of a multi-directional wire arc additive manufacturing system with an automated process planning algorithm. **Journal of Industrial Information Integration**, China , 26, Março 2022. 100265.
5. WILLIAM , E. F. Metal Additive Manufacturing: A Review. **Journal of Materials Engineering and Performance**, 08 Abril 2014. 1917–1928.
6. SUMAN , D.; DAVID , L. B.; S. , S. B. Metallic materials for 3D printing. **MRS Bulletin** , 10 Outubro 2016. 729–741.
7. MALCOLM , D. et al. Effect of wire and arc additive manufacturing (WAAM) process parameters on bead geometry and microstructure. **Full Length Article**, 26, março 2019. 138-146.
8. BINTAO, W. et al. Effects of heat accumulation on microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V alloy deposited by wire arc additive manufacturing. **Full Length Article**, Outubro 2018. 151-160.
9. ABID, S. et al. A Review of the Recent Developments and Challenges in Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process. **J. Manuf. Mater**, 14 Maio 2023. 7, 97.
10. USIMINAS, U. S. D. M. G. S. A. **Usina José Bonifácio de Andrade e Silva**. Belo Horizonte / MG. 2021.
11. VOESTALPINE, B. E. A. F. P. T. A. F. **Voestalpine**, 2023. Disponível em: <www.villaresmetals.com.br/villares/pt/Produtos/Acos-Ferramenta/Trabalho-a-frio/VC131>. Acesso em: 19 Julho 2023.
12. 50320, D. **DIN 50320 Verschleiß - Begriffe, Analyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes**. Beuth Verlag. Berlin. 1979.
13. STOETERAU, R. L. E. A. Tribologia - Apostila de Graduação. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Departamento de Engenharia Mecânica., Florianópolis, p. 110-180, 2004.
14. G65-16, A. **Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus**. West Conshohocken. Pennsylvania. 2016.
15. SOUZA, D. L. D. L.; SALVADOR, J. L. Análise de esforços em um sistema de movimentação de um carro alimentador para prensa de compactação em uma indústria cerâmica. **Cerâmica Industrial**, Criciúma/SC, 22 Fevereiro 2017.
16. FERNANDES, T. D. S. et al. Análise de desgaste nas lastrinas da caixa matriz na indústria de revestimento cerâmicos. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba/PR, Novembro 2020. 85756-85774.
17. BRISTOT, V. M. Máquinas e equipamentos para cerâmica, Criciúma, 1996.



18. MOLDES, I. M. E. <https://www.iconmatrizesemoldes.com.br/produtos-detalhes/conjunto-completo-5>. Acesso em: 28 setembro 2023.