

Análise geométrica de peças fabricadas por máquina de corte a laser de CO₂

Luiz Fernando Segalin de Andrade¹, Guilherme Silva Carvalho Rocha², André Roberto de Sousa³, Aurélio da Costa Sabino Netto⁴

¹PFBMAT - Grupo de pesquisa em processos de fabricação e tecnologia dos materiais, Departamento Acadêmico de Metal Mecânica, Instituto Federal de Santa Catarina – Campus Florianópolis, Brasil. Email: luizsegalin@ifsc.edu.br

²PFBMAT - Grupo de pesquisa em processos de fabricação e tecnologia dos materiais, Departamento Acadêmico de Metal Mecânica, Instituto Federal de Santa Catarina – Campus Florianópolis, Brasil. Email: guilherme.sc21@aluno.ifsc.edu.br

³CSI - Controle e Supervisão Inteligente, Departamento Acadêmico de Metal Mecânica, Instituto Federal de Santa Catarina – Campus Florianópolis, Brasil. Email: asousa@ifsc.edu.br

⁴PFBMAT - Grupo de pesquisa em processos de fabricação e tecnologia dos materiais, Departamento Acadêmico de Metal Mecânica, Instituto Federal de Santa Catarina – Campus Florianópolis, Brasil. Email: asabino@ifsc.edu.br

Resumo

O presente trabalho teve por objetivo a avaliação geométrica de peças poliméricas fabricadas por uma máquina de corte a laser baseada na tecnologia de CO₂ com 150W de potência e mesa de 1200 x 900 mm. O trabalho procurou a partir de estudos metroológicos verificar as distorções na geometria de peças poliméricas fabricadas por este equipamento. Para tanto foram utilizados equipamentos de medição de forma e escaneamento em 3D. Dessa forma, foi possível qualificar os trabalhos resultantes da utilização da máquina e definir possíveis estratégias para melhoria dos resultados de sua utilização.

Palavras-chave: Análise geométrica; corte a laser; laser de CO₂; chapas poliméricas.

Abstract

The objective of this work was the geometric evaluation of polymeric parts manufactured by a laser cutting machine based on CO₂ technology with 150W of power and a 1200 x 900 mm table. The work sought, through metrological studies, to verify distortions in the geometry of polymeric parts manufactured by this equipment. For this purpose, shape measuring and 3D scanning equipment was used. In this way, it was possible to qualify the work resulting from the use of the machine and define possible strategies to improve the results of its use.

Keywords: Geometric analysis; laser cutting; CO₂ laser; polymeric boards.

1. Introdução

A tecnologia de fabricação de peças com laser já é utilizada em muitas indústrias. Faro [1] aponta o crescimento da utilização industrial da tecnologia ao longo dos anos. Esta propicia o desenvolvimento de formas complexas bem como gera uma velocidade maior de execução dos processos de usinagem. A tecnologia está baseada na “focalização de um feixe eletromagnético de alta intensidade em uma superfície pequena, levando ao aquecimento pontual e rápido do material da amostra” [2].

Dentre as diferentes tecnologias de geração do feixe de laser, a que possui um custo mais baixo é a de CO₂. Por esta razão, acaba sendo um equipamento bastante difundido entre espaços destinados a cultura maker

(chamados de Maker Spaces). Neste trabalho utilizar-se-á uma máquina com esta tecnologia.

Powell [3] descreve o processo de geração do laser de CO₂ como um processo onde uma corrente elétrica de altíssima tensão estimula o bombardeio de elétrons a uma alta velocidade sobre a mistura de gases de Nitrogênio, Hélio e Dióxido de Carbono onde as moléculas de CO₂ são excitadas a um determinado nível de energia. Estas moléculas excitadas, ao “relaxarem” (diminuírem seu grau de excitação) acabam liberando uma partícula de energia luminosa – os fótons. Como este processo encontra-se confinado em um tubo de vidro com espelhos côncavos em suas extremidades eles acabam sendo refletidos e alinhados de maneira a criarem um fluxo luminoso que originará o laser. Um dos espelhos

contidos no tubo possui reflexão total e outro parcial (99% de reflexão) tendo no centro um pequeno orifício por onde uma pequena parcela dos raios luminosos alinhados sai na forma de um feixe de laser[4].

Este feixe então é refletido por espelhos distribuídos na máquina de forma a direcionarem o feixe até uma lente. Esta lente tem a função de concentrar o feixe de energia em um ponto o qual estará posicionado num ponto distante da lente. Este ponto é chamado de distância focal [5].

Conforme a bibliografia (MAURÍCIO [6]; KANNATEY-ASIBU [7]; STEEN E MAZUMDER [8]; ELTAWAHNI, OLABI e BENYOUNIS [9]) e sites de fabricantes e vendedores de equipamentos [10] podem ser apontados alguns fatores que influenciam o corte a laser, tais como: o plano de polarização de geração do laser (paralela, angulada ou perpendicular), a forma do feixe do laser, a precisão da superfície da mesa de processamento, os materiais de processamento, bicos e gases auxiliares, a espessura do material em processamento, os parâmetros utilizados no corte, a mecânica de movimentação do bico, e os sistemas de alinhamento e determinação da distância focal da lente, são alguns deles.

A partir destes aspectos, podemos verificar as diferentes fontes de erros advindos da utilização desta tecnologia. Kannatey-Asibu [7], por exemplo, aponta os efeitos da direção do feixe de laser gerado em relação ao plano de polarização do feixe (Figura 1).

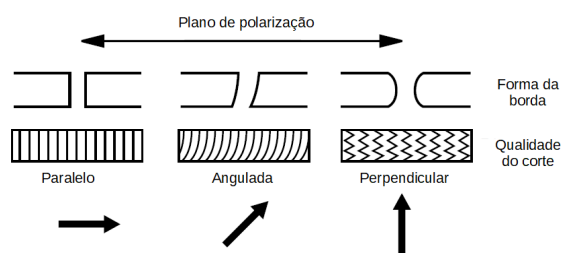


Figura 1. Acabamento da aresta de corte em função do plano de polarização do feixe de laser. Fonte: Adaptada de [7]

Esta figura mostra que em planos de polarização em ângulo ou perpendiculares à direção de atuação do feixe a tendência é o surgimento de uma deformação que Maurício [6] denomina como fenda de corte. A tendência num feixe de laser de CO₂ é o surgimento desta fenda uma vez que o ponto focal da lente tende a ser o mais concentrado no interior do material a ser cortado e depois acaba sofrendo uma abertura (Figura 2).

Por conta disso é possível promover uma variação da distância do bico de corte em relação à peça procurando obter o melhor resultado em termos de precisão dimensional e acabamento do processo conforme apontam Eltawahni, Olabi e Benyounis [9].

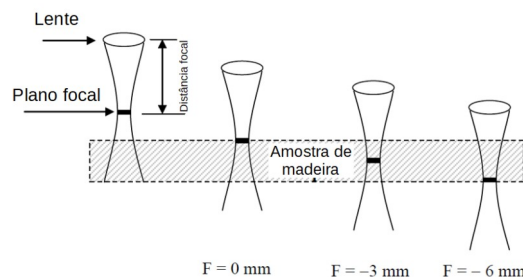


Figura 2. Variação da distância focal em relação à peça. Fonte: Adaptada de [9]

No que diz respeito aos materiais a serem processados, pode-se ter uma diversidade de situações. Por conta de suas características físico-químicas, os diferentes polímeros possuem comportamentos diversos ao serem afetados pelo feixe de energia concentrada. Algumas das propriedades que influenciam no comportamento dos materiais poliméricos – objeto desta pesquisa - em relação à incidência do feixe de laser são a sua baixa condutividade térmica e, em grande maioria, alta absorvidade para radiação no comprimento de onda típico do laser de CO₂ de 10,6 μm [11].

Em relação ao processamento de materiais poliméricos com laser, diferentes trabalhos vêm sendo desenvolvidos nos últimos anos. Zhou e Mahdavian [11] estudaram a profundidade de corte obtida com um laser de CO₂ de 60W de potência em materiais como o acrílico (PMMA), o pinus e a borracha, variando a velocidade de corte do laser. Chen et al [12] avaliaram a rugosidade superficial obtida pelo processamento de chapas de PMMA submetidas a diferentes velocidade de corte, posicionamento da distância focal em relação a superfície das chapas, vazão de gás.

Caiazza et al [13] estudaram o polipropileno (PP), policarbonato (PC) e o polietileno de alta densidade (HDPE) com diferentes tipos de laser em chapas de 2 a 10mm de espessura para o PP e o HDPE e chapas de 3 a 5mm de espessura para o PC. Neste estudo foram utilizadas diferentes potências de laser (200 a 1400W) e foram obtidos perfis de arestas cortadas que demonstram uma deformação do material advinda da ação do laser na região do corte (Figuras 3 e 4).

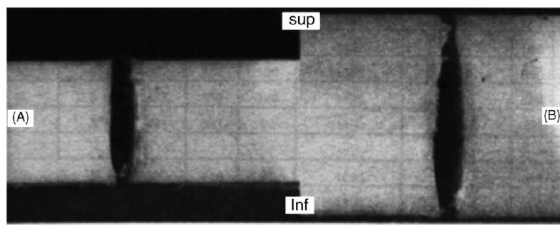


Figura 3. Macrografias em seções transversais de chapas de PP cortadas a laser (sup é a largura do corte na parte superior e inf é a largura do corte na parte inferior). Fonte: Caiazzo et al [13].

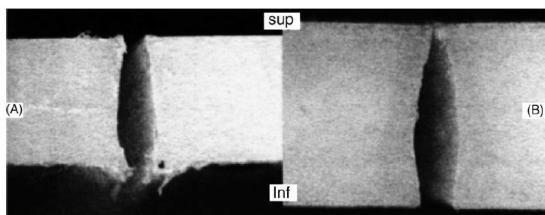


Figura 4. Macrografias em seções transversais de chapas de PE cortadas a laser (sup é a largura do corte na parte superior e inf é a largura do corte na parte inferior). Fonte: Caiazzo et al [13].

Nota-se, a partir das figuras a diferença de comportamento dos materiais estudados pelos autores. Este comportamento foi identificado por Andrade et al [14] no que diz respeito ao corte de poliacetal (POM) e PMMA (Figura 5) e ficou ainda mais exacerbado em chapas mais espessas. Considerando que não foi encontrado estudo em chapas poliméricas com espessura acima de 10mm e com a potência de laser utilizada para o estudo considera-se relevante a pesquisa para a determinação da grandeza das distorções encontradas para o caso em questão.

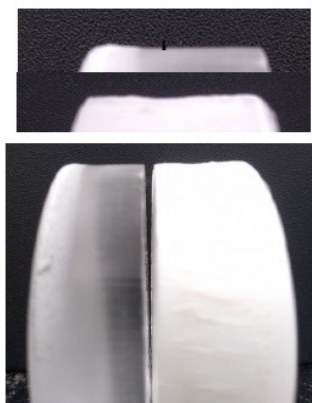


Figura 5. Destaque para o desvio de forma ocasionado pelo corte a laser de chapas poliméricas. Fonte: Elaboração própria.

Outro aspecto a ser observado é o apontado por Andrade et al [14] e Kurt et al [15] que diz respeito a

precisão dimensional das peças fabricadas por corte a laser. Neste aspecto ambos os trabalhos averiguaram o POM como material de estudo em comparação a outros materiais poliméricos. No primeiro caso [14] foram comparados resultados de dimensão com o PMMA e foram levadas em conta diferentes espessuras de material. No segundo caso [15] a comparação foi com o PTFE e os autores optaram por não considerarem a questão da espessura como elemento de avaliação apesar de apontarem como aspecto relevante.

Ainda, trabalhos como o de Davim et al [16] e Khoshaim et al [17] apresentam avaliações do corte a laser de PMMA em diferentes espessuras de chapas e com variação de parâmetros mostrando os impactos destas variações no perfil das bordas e rugosidades superficiais geradas.

A partir do exposto pode-se verificar que há diversos fatores que influenciam o processo de corte de materiais poliméricos ou não metálicos.

Portanto, a correta definição dos parâmetros de corte passa a ser essencial. O PMMA que, conforme visto é um dos materiais poliméricos mais amplamente estudados, para se ter um bom acabamento e evitar a formação de uma “teia” de material que se condensa após o processamento é necessário que se use uma baixa pressão de ar comprimido no bico de corte, efeito que não acontece com o poliacetal (POM). Também os diferentes tipos de MDF possuem comportamentos diferentes na execução de cortes e gravação. Assim, é fundamental que se executem testes para a definição dos parâmetros corretos no início da produção [2] e [9].

A espessura dos materiais também acaba por ser um fator determinante da efetividade, qualidade superficial do corte e precisão dimensional. Como mostrado na Figura 2, conforme aumenta-se ou diminui-se a distância focal, pode-se ter diferentes resultados.

Ainda, os cuidados relativos à preparação da máquina devem ser tomados a cada turno de sua utilização. A verificação do alinhamento dos espelhos, a limpeza dos mesmos e da lente, verificação do nível da mesa quando for o caso, são fatores que têm influência nos resultados do processo.

Outro fator a ser considerado é o tipo de gás de assistência e sua pressão. Como dito anteriormente, a pressão do gás de assistência ou a falta desta pode causar o surgimento de efeitos indesejados conforme o material a ser usinado. O laser, por ser um feixe de energia, possui a característica de não se manter concentrado caso a pressão do gás de assistência seja insuficiente. Por outro lado, determinados tipos de material acabam se resfriando com muita velocidade com uma pressão muito alta do referido gás. Diante disso surgem efeitos como o relatado por Maurício [6] de formação de rebarbas no aço, por exemplo.

Por todos estes fatores o estudo do comportamento do material conforme a condição de corte é relevante para correção ou otimização de parâmetros para que se obtenha os melhores resultados possíveis na usinagem.

Diante destes aspectos o presente trabalho teve por objetivo a avaliação geométrica de peças poliméricas fabricadas por uma máquina de corte a laser baseada na tecnologia de CO₂ com 150W de potência e mesa de 1200 x 900 mm. O trabalho procurou a partir de estudos metrológicos prévios verificar as distorções na geometria de peças fabricadas por este equipamento. Desta forma, torna-se possível qualificar os trabalhos resultantes da utilização da máquina e definir possíveis estratégias para melhoria dos resultados de sua utilização. Para tanto, foram realizados testes de corte com diferentes materiais poliméricos e espessuras, o que permitiu ter uma base de comparação para a análise de efeitos destes diferentes fatores na utilização da máquina.

A partir destes resultados, foi, então, possível verificar como os diferentes materiais reagem ao corte por um feixe de energia concentrado, fator apontado na bibliografia como uma fonte de erros geométricos no material [1]. Esta definição também possibilita que seja feita uma verificação do estado da máquina ao longo do tempo uma vez que a necessidade de manutenção de um equipamento muitas vezes pode ser identificada pelo aumento progressivo dos erros gerados pela utilização da mesma.

2. Metodologia

A metodologia empregada na pesquisa foi baseada no corte de chapas de poliacetal (POM) e PMMA. Estes materiais foram escolhidos para serem estudados em diferentes espessuras devido a estudos anteriores terem demonstrado indícios de distorção nas silhuetas das peças cortadas (Figura 5).

Para o estudo realizado foi utilizada uma máquina de corte a laser a gás CO₂, com 150W de potência (Figura 6), com uma lente de distância focal de 2 (duas) polegadas. O ponto de atuação do laser foi definido como sendo a superfície da peça para realizar o corte de discos de POM e PMMA com diâmetro nominal de 50mm nas seguintes espessuras: 17 mm, 11 mm e 7 mm para o poliacetal, e 15 mm, 10.5 mm, 6mm e 3mm, para o acrílico.



Figura 6. Máquina utilizada nos ensaios. Fonte: Elaboração própria.

Neste estudo, foram fabricados 10 (dez) discos em cada espessura apresentada para analisar a variância de circularidade e cilíndricidade. As medições foram realizadas em ambiente controlado utilizando um circularímetro calibrado da marca Mitutoyo, modelo RA 1600 que possui uma exatidão radial de $0,02 + 6.H/10000$ micrômetros (H = altura medida) e exatidão axial de $0,02 + 6.X/10000$ micrômetros (X = distância do centro de rotação) (Figura 7) para a obtenção dos valores, que foram analisados posteriormente em relação a variância e desvio padrão. Com o resultado das medições, foi efetuado um estudo estatístico baseado na média dos erros encontrados e na Análise de Variância para verificação da influência dos diferentes materiais na geometria da peça cortada.



Figura 7. Medição com Circularímetro. Fonte: Elaboração própria.

Os cortes foram realizados na forma de círculos e posteriormente submetidos a avaliação no circularímetro para verificação da cilíndricidade dos mesmos. Esta avaliação foi realizada executando-se 6 medições espaçadas igualmente ao longo das superfícies geradas pelo corte, propiciando um desenho do perfil do cilindro gerado na maioria das

amostras. Apenas na chapa de 3mm de espessura de PMMA não foi executada esta rotina pelo pouco espaço para realização da mesma. Neste caso específico foi realizada apenas a medição da circularidade da amostra.

Com o resultado das medições, foi efetuado um estudo estatístico baseado em Análise de Variância (ANOVA) para verificação da influência dos diferentes fatores na geometria da peça cortada. A ANOVA foi feita considerando as diferentes espessuras dentro do mesmo material para verificar a influência da espessura da chapa no desvio gerado, também foi realizada a ANOVA entre materiais considerando pares de chapas com pouca diferença de espessura (6mm PMMA - 7mm POM; 10,5mm PMMA - 11mm POM; 15mm PMMA - 17mm POM). Outra análise realizada foi considerando os erros nas diferentes chapas de modo a verificar o comportamento dos erros médios das amostras em termos das espessuras de chapas.

A seguir encontram-se relatados os resultados da pesquisa.

3. Resultados

Após as medições das peças, conforme as sugestões realizadas no trabalho de Andrade, Souza e Oliveira [14], e o tratamento dos dados resultantes das medições com o circularímetro (Tabelas 1, 2, 3 e 4), foi possível elaborar as ANOVAs ($\alpha = 0,05$) entre as chapas de acrílico de 6 mm de espessura e poliacetal de 7 mm (Tabela 5), entre as chapas de acrílico de 10,5 mm de espessura e poliacetal de 11 mm (Tabela 6), entre as chapas de acrílico de 15 mm de espessura e poliacetal de 17 mm (Tabela 7).

Tabela 1. Resultados dos erros calculados a partir da medição das amostras de PMMA de 6mm e de POM de 7mm de espessura.

Amostra/Material	PMMA - 6mm	POM - 7mm
Amostra 1	160,9	210,086
Amostra 2	181,77	183,979
Amostra 3	190,97	259,819
Amostra 4	237,58	172,784
Amostra 5	216,83	267,204
Amostra 6	222,62	130,494
Amostra 7	173,93	178,397
Amostra 8	150,6	259,845
Amostra 9	139,35	151,363
Amostra 10	160,48	252,395

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 2. Resultados dos erros calculados a partir da medição das amostras de PMMA de 10,5mm e de POM de 11mm de espessura.

Amostra/Material	PMMA - 10,5mm	POM - 11mm
Amostra 1	207,99	284,54
Amostra 2	189,84	366,24
Amostra 3	192,77	363
Amostra 4	259,58	239,21
Amostra 5	215,8	339,15
Amostra 6	254,67	327,41
Amostra 7	232,96	235,63
Amostra 8	277,01	318,89
Amostra 9	219,65	239,78
Amostra 10	208,85	293,37

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 3. Resultados dos erros calculados a partir da medição das amostras de PMMA de 15mm e de POM de 17mm de espessura.

Amostra/Material	PMMA - 15mm	POM - 17mm
Amostra 1	359,18	412,81
Amostra 2	265,06	552,34
Amostra 3	382,2	535,23
Amostra 4	337,22	577,51
Amostra 5	457,43	510,93
Amostra 6	361,08	388,34
Amostra 7	393,82	385,42
Amostra 8	409,05	443,66
Amostra 9	326,82	457,35
Amostra 10	317,59	419,07

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 4. ANOVA das amostras de PMMA de 6mm e de POM de 7mm de espessura.

Origem de variações	SS	df	MS	F	Valor P	F crítico
Material	2675,9	1	2675,86	1,28	0,29	5,12
Amostra	13740,1	9	1526,68	0,73	0,68	3,18
Error	18791,8	9	2087,97			
Total	35207,7	19				

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 5. ANOVA das amostras de PMMA de 10,5mm e de POM de 11mm de espessura.

Origem de variações	SS	df	MS	F	Valor P	F crítico
Material	27982,8	1	27982,8	12,52	0,01	5,12
Amostra	10405,5	9	1156,17	0,52	0,83	3,18
Error	20111,3	9	2234,59			
Total	58499,6	19				

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 6. ANOVA das amostras de PMMA de 15mm e de POM de 17mm de espessura.

Origem de variações	SS	df	MS	F	Valor P	F crítico
Material	57588,8	1	57588,8	12,4	0,01	5,12
Amostra	28940,6	9	3215,63	0,69	0,7	3,18
Error	41797,9	9	4644,21			
Total	128327,3	19				

Fonte: Elaboração própria.

Levando-se em conta os dados contidos nas Tabelas pode-se constatar que as amostras das chapas de 6mm de PMMA e 7mm de POM (dados apresentados na Tabela 1) não apresentaram uma interferência significativa em relação ao material. Isto é comprovado considerando-se que o fator F está abaixo do F crítico e o valor p encontra-se acima do valor de alfa.

Contudo, analisando-se as demais combinações é possível verificar a influência do material por conta dos valores apresentados nas tabelas 2 e 3 nas nas ANOVA apresentadas nas tabelas 5 e 6. Nestas os fatores F apresentam um valor acima do F crítico e os valores p em ambos os casos são menores que o valor de alfa.

Considerando ainda os valores médios obtidos com as medições das amostras também foi possível obter um gráfico do perfil do erro em função da espessura da chapa nos diferentes materiais (Figura 8).

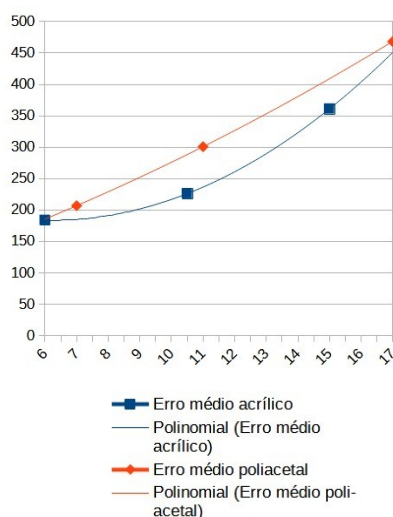


Figura 8. Gráfico com as médias dos erros das amostras das diferentes espessuras e materiais. Fonte: Elaboração própria.

Este gráfico propicia uma visualização mais clara da diferença de comportamento dos materiais uma vez que apresenta, também uma linha de tendência em função da espessura cortada.

Além do acima exposto, o circularímetro utilizado permite gerar imagens e gráficos mostrando as distorções das amostras medidas com uma escala de ampliação dos erros. Estas imagens exacerbam os

problemas geométricos das peças. As Figuras abaixo procuram mostrar as diferentes amostras medidas. As Figuras 9 e 10 mostram os problemas de circularidade nas amostras de PMMA de 3mm de espessura.

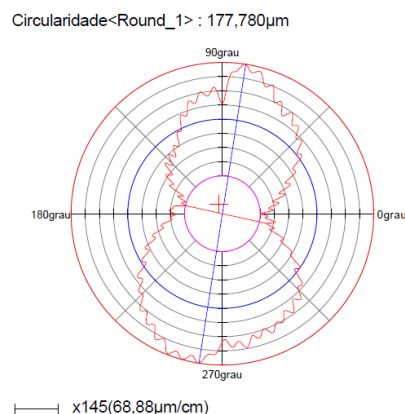


Figura 9. Representação gráfica do desvio de circularidade de amostra de PMMA de 3mm de espessura. Fonte: Elaboração própria.

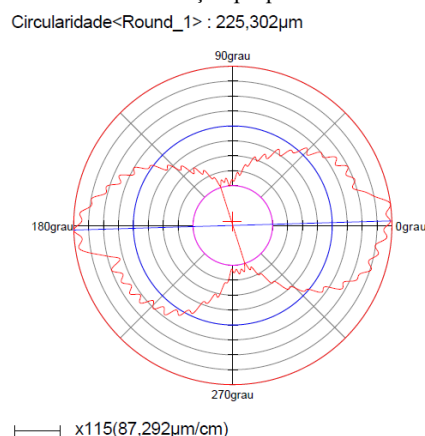


Figura 10. Representação gráfica do desvio de circularidade de amostra de PMMA de 3mm de espessura. Fonte: Elaboração própria.

Desprezando-se os eixos de medição, as figuras mostram uma similaridade geométrica entre as amostras, no entanto, é visível a distorção em relação ao que seria um círculo ideal. Também há uma questão relativa a própria rugosidade superficial a qual é avaliada por vários dos trabalhos referenciados mas, que conforme mostrado na Figura 5, é facilmente perceptível mesmo por foto.

Já as amostras das demais chapas são apresentadas a seguir (Figuras 11 a 16):

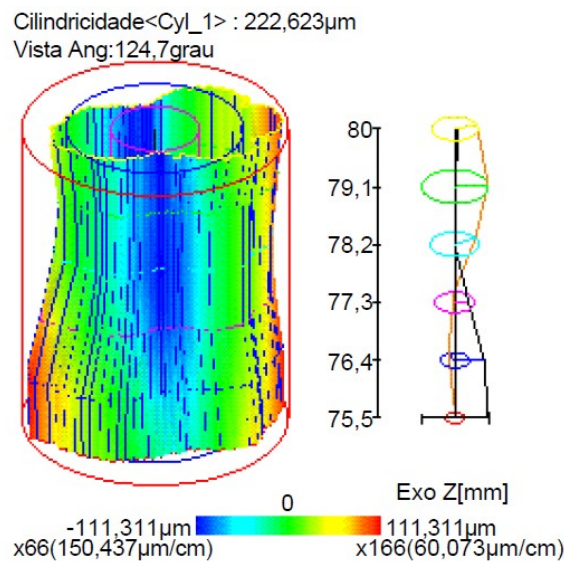


Figura 11. Representação gráfica do desvio de cilindridade de amostra de PMMA de 6mm de espessura.

Fonte: Elaboração própria.

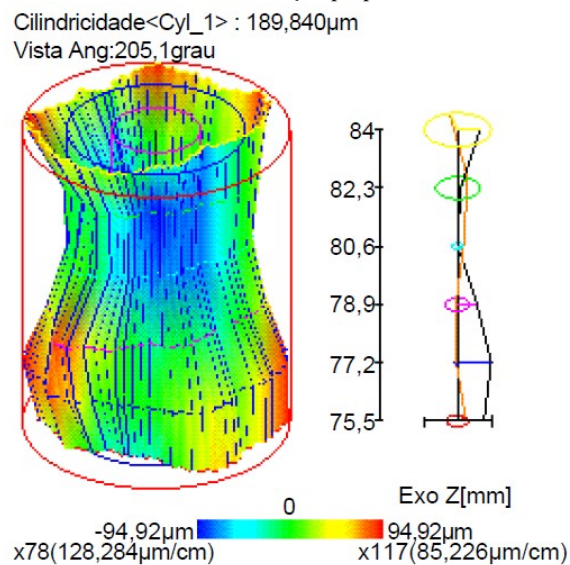


Figura 12. Representação gráfica do desvio de cilindridade de amostra de PMMA de 10,5mm de espessura. Fonte: Elaboração própria.

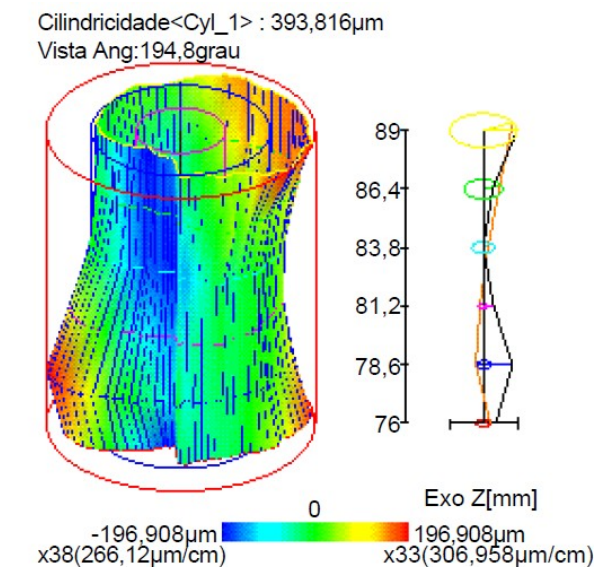


Figura 13. Representação gráfica do desvio de cilindridade de amostra de PMMA de 15mm de espessura.

Fonte: Elaboração própria.

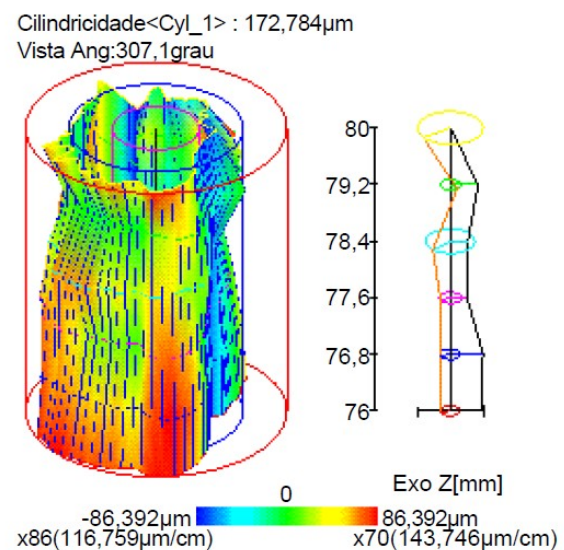


Figura 14. Representação gráfica do desvio de cilindridade de amostra de POM de 7mm de espessura.

Fonte: Elaboração própria.

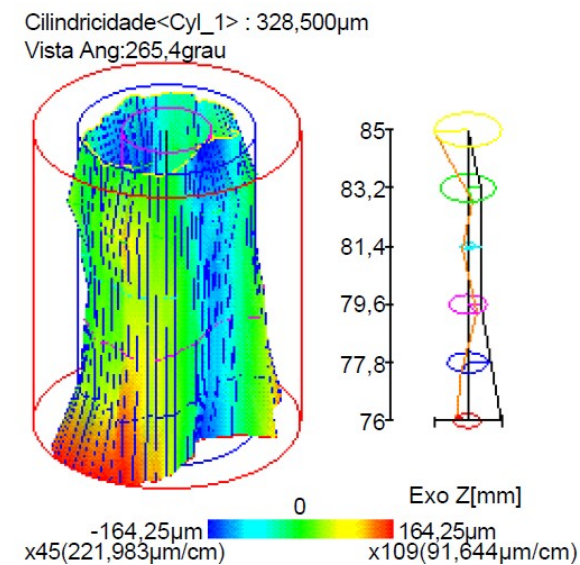


Figura 15. Representação gráfica do desvio de cilindridade de amostra de POM de 11mm de espessura.
Fonte: Elaboração própria.

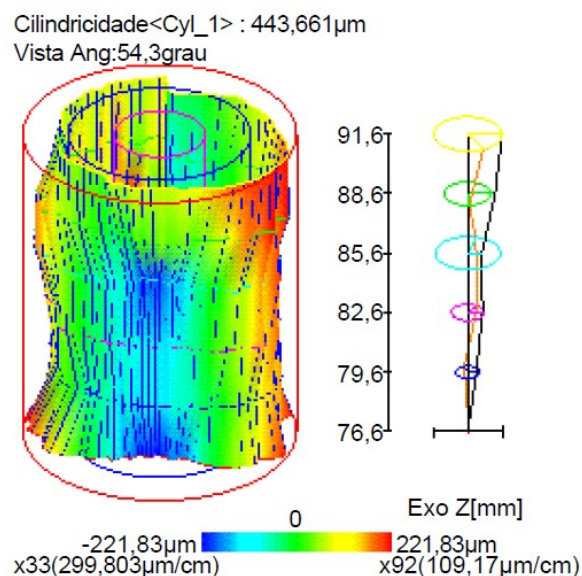


Figura 16. Representação gráfica do desvio de cilindridade de amostra de POM de 17mm de espessura.
Fonte: Elaboração própria.

Considerando-se as figuras acima associadas com a Figura 5, pode-se verificar uma diferença de padrão nas amostras dos diferentes materiais. Enquanto o PMMA apresenta uma tendência a desenvolver uma concavidade na região afetada pelo feixe de laser, no caso do POM não podemos fazer a mesma afirmação. Esta diferença de comportamento pode ser constatada também no caso do PE e PP apontada por Caiazza et al [13] (Figuras 2 e 3). Assim, é importante fazer estas considerações em função da aplicação das peças cortadas e sua necessidade de precisão geométrica e

também dimensional a fim de evitar questões de falhas ou imprecisões de uso.

4. Considerações finais

A partir do estudo realizado pôde-se constatar a existência de variações conforme a espessura e tipo de material. Estas reforçam a necessidade de revisar as estratégias tomadas no momento de realizar uma operação de corte utilizando a tecnologia a laser de CO₂ de modo a atenuar essas variações e garantir tolerâncias finais mais precisas no produto final. Cabe destacar que os resultados obtidos coadunam com pesquisas anteriores mas que estas não foram desenvolvidas com a aplicação em chapas de maior espessura dos diferentes materiais. Para um futuro trabalho, seria interessante utilizar lentes com diferentes distâncias focais e variação de outros parâmetros de corte de modo a verificar possíveis mitigações de erros nas superfícies cortadas.

Também, conforme apontado anteriormente, pode-se destacar que, dependendo da aplicação das peças a serem fabricadas com esta tecnologia, pode ser necessário um processamento posterior a fim de promover uma melhoria da qualidade da superfície gerada.

5. Agradecimentos

Os autores do artigo agradecem ao CNPq pelo financiamento do presente trabalho por meio de bolsa do Programa de Iniciação ao Desenvolvimento Tecnológico e Inovação e de apoio a compra dos insumos necessários para a pesquisa. Por meio do EDITAL 02/2023/PROPI - EDITAL UNIVERSAL DE PESQUISA do Instituto Federal de Santa Catarina.

6. Referências

- [1] T. M. C. C. de B. e Faro. *Estudo e otimização do corte laser de alta velocidade em chapa metálica fina*. 2006. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2006. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/11467/2/Texto%20integral.pdf>.
- [2] Cidade, M. K., Lima, N. F. F., Palombini, F., & da Cunha Duarte, L. (2016). Método para determinação de parâmetros de gravação e corte a laser CO₂ com aplicação na joalheria contemporânea. *Design & Tecnologia*, 6(12), 54-64. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/151090>.

- [3] J. Powell. *CO₂ laser cutting*. 2. ed. London: Springer London, 1998.
- [4] R. T. Sutter, T. J. Fellers, M. W. Davidson. *Stimulated Emission in a Laser Cavity*. Disponível em : <https://www.olympus-lifescience.com/pt/microscope-resource/primer/java/lasers/heliumneonlaser/>.
- [5] *LENTE Laser CO₂ 12mm para Máquina de Corte a Laser CNC*. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/impressora-3d-e-cnc-arduino/lente-laser-co2-12mm-para-maquina-de-corte-a-laser-cnc-5722.html>.
- [6] H. A. C. Maurício. *Análise do Processo de Corte a Laser numa Pequena Empresa Metalomecânica* 2014. 96f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial) - Departamento de Economia, Gestão e Engenharia Industrial , Universidade de Aveiro, Aveiro, 2014. Disponível em: <https://ria.ua.pt/bitstream/10773/15084/1/An%C3%A1lise%20do%20Processo%20de%20Corte%20a%20Laser%20numa%20Pequena%20Empresa%20Metalomec%C3%A2nica.pdf>.
- [7] E. Kannatey-Asibu. *Principles of laser materials processing*. New Jersey: Wiley, 2009.
- [8] W. M. Steen, J Mazumder. *Laser material processing*. 4. ed. London: Springer London, 2010.
- [9] H. A. Eltawahni, A. G. Olabi, K. Y. Benyounis. Investigating the CO₂ laser cutting parameters of MDF wood composite material. *Optics and Laser Technology*, vol. 43, no. 3, pp. 648–659, 2011.
- [10] *Quais são os fatores que afetam a precisão de corte das máquinas de corte a laser de fibra?* Disponível em: <https://www.glorylaser.com.br/perguntas-frequentes/10.html>.
- [11] Zhou, B. H., & Mahdavian, S. M. (2004). Experimental and theoretical analyses of cutting nonmetallic materials by low power CO₂-laser. *Journal of materials processing technology*, 146(2), 188-192. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092401360301001X?casa_token=8MsXN2kD8DoAAAAA:rBTnva4NcgYcnNIQIf4HIO47Zb1lYrm-74m8LrkBjSuFQTKS1vi4Tm9QUFxeV8VxoPEcOlc_222-228. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816610001995?casa_token=yUXEn8ePvxYAAAAA:bCfQ6ltnN4-Tis2rKU6lPrvDfl10nwxVju6eI3kwNf42akwnfKAc8bxJwzzD1OwLytA8ECqp
- [13] Caiazza, F., Curcio, F., Daurelio, G., & Minutolo, F. M. C. (2005). Laser cutting of different polymeric plastics (PE, PP and PC) by a CO₂ laser beam. *Journal of Materials Processing Technology*, 159(3), 279-285. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013604002109?casa_token=PGJE4xaYfmkAAAAA:zxZiFV6IQoYBNFuh4rElfAXI4khB8R8dTDXaSSSiBHW2ZuBq3OliKgltmTVr-F4FtdO7AUa3
- [14] L. F. S. de Andrade, R. A. C. de Oliveira, A. R. de Sousa. *Avaliação dimensional de peças fabricadas por máquina de corte a laser de CO₂*. Trabalho não publicado.
- [15] Kurt, M., Kaynak, Y., Bagci, E., Demirer, H., & Kurt, M. (2009). Dimensional analyses and surface quality of the laser cutting process for engineering plastics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41, 259-267. Disponível em: https://idp.springer.com/authorize/casa?redirect_uri=https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-008-1468-7&casa_token=mhPwPw00IHUAAAAA:0AqetnDN1gD_dliYNeC4vWYneA2a1B7sznnm7lnjKYmUi5j5Gn0a4rJeH--EendYxDbzZGHomSF2oo
- [16] Davim, J. P., Barricas, N., Conceição, M., & Oliveira, C. (2008). Some experimental studies on CO₂ laser cutting quality of polymeric materials. *Journal of materials processing technology*, 198(1-3), 99-104. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092401360700653X?casa_token=gS_YuZW7MIMAAAAA:XJ7ji1LhazM8-MhoVhNJkDAMN0SjKPmWiN4-hqM_Vda3zBQONDJh7h5jrNtAkW5pEYc-VR4N
- [17] Khoshaim, A. B., Elsheikh, A. H., Moustafa, E. B., Basha, M., & Showaib, E. A. (2021). Experimental investigation on laser cutting of PMMA sheets: Effects of process factors on kerf characteristics. *Journal of Materials Research and Technology*, 11, 235-246. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S238785421000120>
- [12] Chen, M. F., Ho, Y. S., Hsiao, W. T., Wu, T. H., Tseng, S. F., & Huang, K. C. (2011). Optimized laser cutting on light guide plates using grey relational analysis. *Optics and Lasers in Engineering*, 49(2),