

ANÁLISE DA CONTRAÇÃO NA ESTEREOLITOGRAFIA VARIANDO POSIÇÃO E ORIENTAÇÃO NA PLATAFORMA DE IMPRESSÃO

Arthur Wilson Fonseca Coelho, awf.coelho@mecanica.ufrj.br¹

Anna Carla Monteiro Araujo, anna@mecanica.ufrj.br¹

Rossana Mara Thiré, rossana@metalmat.ufrj.br²

¹ Programa de Engenharia Mecânica - COPPE/UFRJ

² Programa de Engenharia de Materiais e Metalurgia - COPPE/UFRJ

Resumo: A estereolitografia é um dos processos mais utilizados de manufatura aditiva. Uma resina líquida é utilizada como matéria-prima e uma reação de cura faz com que uma camada desta resina vá para o estado sólido. Como qualquer tipo de processo de fabricação, a estereolitografia tem suas limitações. Entre essas limitações, a contração dimensional nas peças fabricadas é o fenômeno mais comum. Para minimizá-lo, é muito importante saber quais parâmetros envolvidos no processo de fabricação podem influenciar no grau de contração das peças impressas. Neste artigo, a contração de peças em diferentes orientações e localizações foi analisado pela técnica de análise de variância (ANOVA). De acordo com os resultados, verificou-se que a localização das peças na plataforma é um fator importante em função das orientações das dimensões das geometrias fabricadas.

Palavras-chave: Manufatura aditiva, SLA, Estereolitografia, ANOVA.

1. Introdução

Manufatura aditiva (*Additive Manufacturing* - AM) é um processo de fabricação em que camadas de pequena espessura são construídas uma sobre as outras para a formação de uma peça sólida. De acordo com Król *et al.* (2013), esse tipo de processo de fabricação foi introduzido pela primeira vez em 1987 com o advento do processo de Estereolitografia (*Stereolithography* - SLA). Atualmente, a AM já é utilizada em diversas áreas como a área automotiva, aeroespacial e médica, sendo a estereolitografia um dos processos de AM mais utilizados nos dias de hoje. Essa técnica tem o potencial de ser útil em diversas aplicações como, por exemplo, na área de microfluídica, Sistemas MicroEletroMecânicos (*Micro Electrical Mechanical Systems* - MEMS), estruturas porosas para tecidos vivos e moldes.

A SLA possui duas técnicas de formação da camada 2D distintas: Estereolitografia por Escaneamento (*Scanning-based Stereolithography* - SSL) e Estereolitografia por Projeção ou de Fundo (*Projection-based Stereolithography* - PSL). No processo de PSL se usa uma luz ultra-violeta (UV) que é projetada sobre toda a área da camada 2D, como apresenta a Fig. 1. O equipamento utilizado neste processo consiste de um emissor de luz UV, uma lente pela qual a luz converge e atinge um chip conhecido como Dispositivo Microespelhado Digital (DMD - Digital Micromirror Device), que tem a função de formar a imagem de cada camada da peça produzida. A imagem formada passa pela lente de projeção do projetor e então atinge um espelho que está posicionado a 45° em relação ao projetor e ao reservatório. A luz ao atingir a camada de resina entre a plataforma e o fundo do reservatório faz com que a resina fotopolimerize, realizando o processo de cura, ou seja, formando uma camada de polímero sólido (Emami *et al.*, 2014).

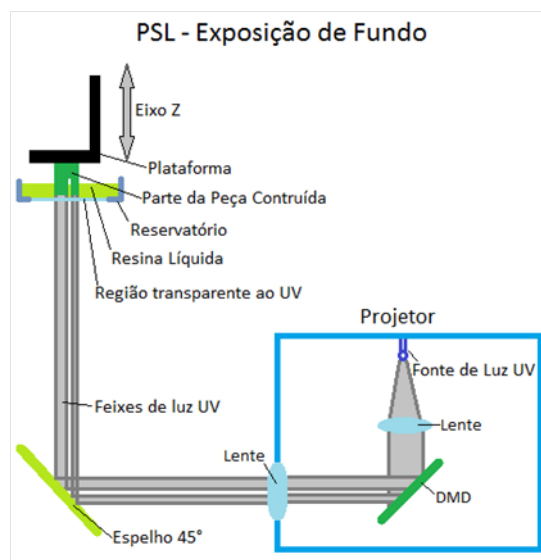


Figura 1: Processo de SLA de projeção por exposição de fundo. Adaptado de Emami *et al.* (2014)

Comparada a outros processos de manufatura aditiva, o processo de estereolitografia consegue obter grande precisão e acurácia. A alta resolução da projeção do laser ou da luz UV e ao reduzido tamanho de camada proporciona esta qualidade dimensional. No entanto, diversas imperfeições podem ser encontradas nas peças produzidas por SLA pois ainda há limitações que podem influenciar na peça fabricada, das quais a mais crítica é a contração dimensional.

O fenômeno de contração acontece tanto durante a fase de construção da peça quando na fase de pós-cura, quando o laser ou luz UV fotopolimeriza a resina. A transformação dos monômeros (no estado líquido) em um polímero de ligação cruzada (estado sólido) faz com que haja o crescimento do número de ligações covalentes que por serem mais fortes que as forças intermoleculares de Van der Waals, faz com que ocorra a contração da área da camada (Ji *et al.*, 2013). Assim, a contração está diretamente relacionada ao grau de polimerização da resina e, consequentemente, aos fatores que o influenciam diretamente, por exemplo, a concentração de fotoiniciadores, a intensidade da luz, a temperatura de cura e a estrutura do monômero (Wang *et al.*, 1996).

No artigo produzido por Zhou *et al.* (2000), a precisão dimensional e geométrica de peças produzidas por estereolitografia por escaneamento foi avaliada em função da influência da espessura de camada, da distância entre as trajetórias do laser em cada camada, a influência do grau de sobre-cura, da distância entre o espalhador e a superfície da resina e a posição na plataforma. Foi observado que o grau de sobre-cura, a distância entre caminhos do laser e a posição da peça na plataforma foram os fatores que mais influenciam a acurácia.

Para minimizar o efeito da contração, Huang *et al.* (2015) desenvolveu um método matemático para otimizar a geometria. Através de dados experimentais, foi possível realizar a previsão das regiões da camada que são mais suscetíveis à contração em função da posição angular e radial. Desta forma, um termo em função de coordenadas polares é adicionado à equação que descreve a forma da peça no plano xy . Com esta correção na equação, foi possível compensar o efeito da contração em geometrias com formas cilíndricas. Posteriormente, este método foi aprimorado para formas livres, onde a geometria pode ser aproximada através de polígonos ou seções circulares (Luan and Huang, 2015).

Wang *et al.* (1996) realizou um estudo sobre os quais dos parâmetros do processo que podem influenciar na contração de peças fabricadas por estereolitografia. Foram avaliados: a potência do laser UV, a espessura de cada camada, a distância entre cada passagem do laser em uma mesma camada, a velocidade de avanço do traçado do laser, a estabilidade do laser e a taxa de absorção de luz da resina. No entanto, não foi estudado o efeito da contração sob a influência da posição e da orientação da peça.

No presente estudo, foi avaliada a influência da localização e da orientação da peça na plataforma de impressão na contração dimensional das peças fabricadas. Foi mantido o polímero utilizado em todas as peças, assim como a espessura da camada e o grau de sobre-cura e foi utilizada a projeção de fundo com luz ultra violeta. A perfilometria foi utilizada para a avaliação dimensional.

2. Materiais e Métodos

A realização dos experimentos foi composta de duas fases: a manufatura da peça teste, com geometria idealizada para a avaliação dos parâmetros de fabricação, e a perfilometria. Em um estudo anterior (Coelho, 2016) realizou a avaliação de acurácia na espessura de aletas fabricadas pelo mesmo equipamento.

2.1 Equipamento de SLA e material polimérico

O equipamento utilizado neste estudo foi uma impressora SLA, *Projet 1200* da *3D Systems* capaz de produzir suas peças sob uma plataforma com dimensões de 43 mm de comprimento e 27 mm de largura (nas direções de impressão x e y , respectivamente). Estas dimensões representam a maior área de fabricação de cada camada com uma altura máxima de impressão de 150mm (direção z). A resolução no plano xy deste equipamento é de 0,056 mm e a altura da camada foi constante para os experimentos, com espessura de camada de 0,03 mm. Neste equipamento, os únicos parâmetros de fabricação que podem ser modificados são: a localização da impressão na plataforma, a taxa de sobre-cura, o fator de compensação de contração e a orientação de construção das peças.

A matéria-prima líquida contida no cartucho de impressão utilizada para fabricar o corpo de prova é: dois monômeros, trietileno glicol diacrilato e diacrilato de triciclododecano dimetanol, tendo como fotoiniciador o óxido de fenil-bis(2,4,6-trimetilbenzoi)-fosfina, fornecido pela *3D Systems* com o nome comercial *VisiJet FTX Green*.

2.2 Parâmetros de Impressão e Planejamento de Experimentos

Para a análise da contração da dimensão foram produzidas três peças conforme Fig. 2. A peça possui uma base de 43 mm de comprimento e 26 mm de largura para que possa ocupar o máximo de área da plataforma de impressão. Sobre a base da peça há 9 formas geométricas idênticas, porém posicionadas em locais diferentes para que possa ser analisada a influência da localização da plataforma na contração destas formas.

Esta geometria tem forma de cruz com as dimensões indicadas na Fig. 2, com 3,5 mm de comprimento em cada lado, largura de 0,6 mm e 0,8 mm de altura. A altura escolhida teve como objetivo garantir que seja possível a leitura do perfil geométrico através de um perfilômetro, já que o mesmo tem amplitude de leitura máxima de 1 mm. A razão do formato de cruz é a análise da contração sob diferentes orientações em relação ao plano zx da máquina. Portanto, um eixo da cruz paralelo ao plano xz é chamado de dimensão L_x da geometria, e seu ortogonal, no plano zx , será chamado de dimensão L_y da geometria.

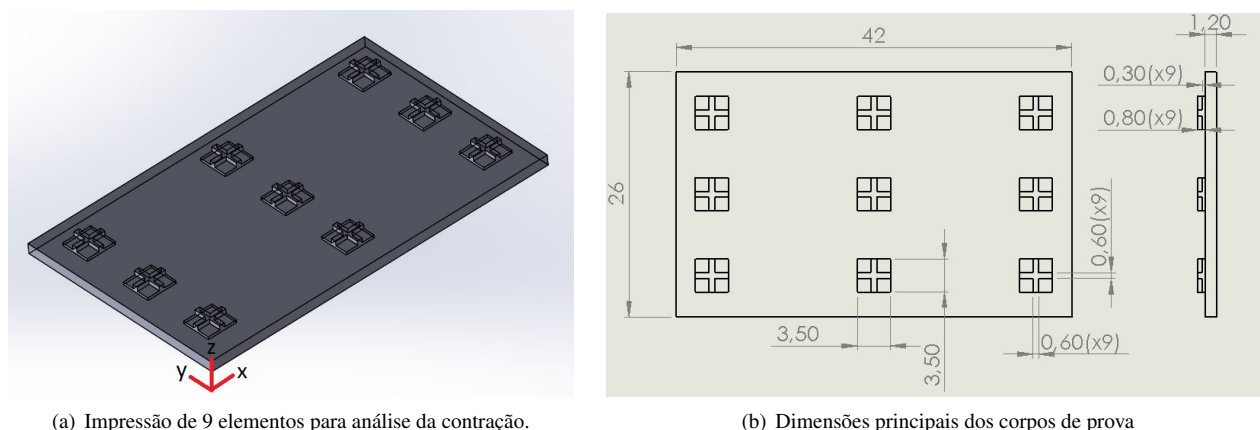


Figura 2: Informações do corpo de prova fabricado

Entre os parâmetros de importância na fabricação das peças, os que foram estudados foram a localização da forma geométrica na plataforma e a orientação da mesma em relação ao plano zx . A escolha desses parâmetros se deve ao fato de não ser conhecido se a contração é mais severa no centro ou nas margens da plataforma de impressão ou se a dimensão x ou y da geometria pode ter correlação com essas localizações.

A localização de cada forma geométrica é definida por dois fatores: a posição das geometrias no eixo x , fator latitude, e a posição da geometria no eixo y , que será chamado de fator longitude. Para cada fator, foram atribuídos três níveis que correspondem as localizações norte (+1), centro(0) e sul(-1) para o fator longitude, e as localizações oeste(+1), centro(0) e leste(-1) para o fator latitude.

Sobre a orientação de construção das peças, a orientação pode ser a rotação de determinada geometria em relação ao plano xy ou ao plano zx da máquina. Como o plano xy é onde a camada é projetada e construída e portanto onde há a maior taxa de contração, a orientação a ser analisada será apenas em relação ao plano zx .

Seguindo a mesma lógica, a taxa de sobre-cura não foi analisada pois sua principal influência é na dimensão z da peça, ou seja, não apresenta influência no plano de xy , portanto a taxa de sobre-cura foi mantida fixa na fabricação de todas as peças. E por último, o fator de compensação de contração é um fator que influencia diretamente na contração mas é conhecida a influência na contração da peça, e por isso também foi mantido constante.

O tempo de fabricação para cada peça foi de 17min e assim que ambas as peças tiveram esse processo finalizado foi feita a aplicação de solvente utilizando álcool isopropílico. Não foi aplicado jateamento de ar de baixa pressão para melhor remoção da mistura de resina não curada com solvente. Após essa etapa, a pós-cura da peça foi feita na câmara de pós-processo da própria máquina e o tempo de cura foi de cerca de 24 minutos para cada uma das três peças fabricadas.

A Tabela 1 apresenta os fatores da localização de cada forma geométrica assim como seus níveis. A variável de saída analisada é a taxa de contração da dimensão x , $S_x(\%)$, e y : $S_y(\%)$. Como o processo de fabricação foi realizado três vezes possuindo 2 fatores com 3 níveis cada um e duas variáveis de saída o número total de medições realizado foi de 54.

A influência dos parâmetros na contração foi verificada a partir da análise de variância (ANOVA) de dois fatores, latitude e longitude, para a dimensão x e y da cruz. A interação dos fatores será analisada para verificar se os fatores combinados apresentam algum influência significativa.

Tabela 1: Planejamento do Experimento

Fatores	Níveis			Saídas	
Longitude	Norte(+1)	Centro(0)	Sul(-1)	$S_x(\%)$	$S_y(\%)$
Latitude	Oeste(+1)	Centro(0)	Leste(-1)	$S_x(\%)$	$S_y(\%)$

2.3 Metodologia para medição do perfil da peça

Após a pós-cura das peças, as dimensões x e y de cada geometria foram realizadas com um perfilômetro digital Taylor Hobson modelo 112-2011 com apalpador de $2\ \mu\text{m}$ de raio de ponta e ângulo de ponta de 45° . A Figura 3 mostra o conjunto equipamento-amostra.

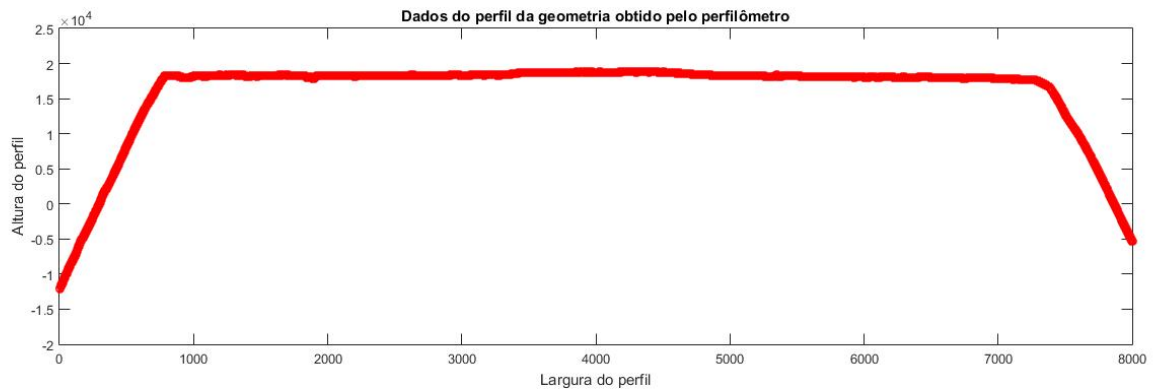


Figura 3: Perfilômetro utilizado para avaliação da geometria sem a retirada da peça da plataforma

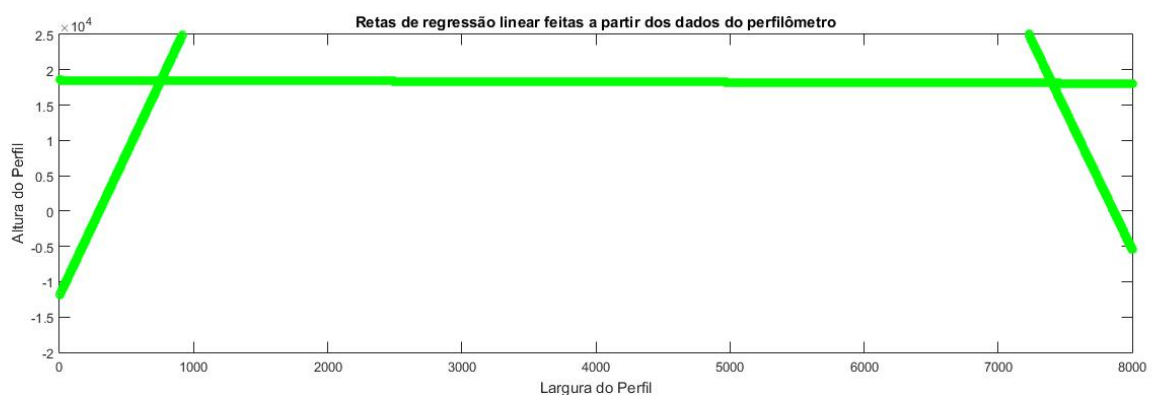
O perfil identificado pelo equipamento é digitalizado e o arquivo texto pode ser registrado para análise em outros softwares, como aquela apresentado na Fig. 4a. A partir do perfil de cada peça em cada geometria na orientação correspondente a dimensão x e y , foi desenvolvida uma pequena em linguagem *Matlab* para que se fosse obtida a cota desejada nas direções x e y , isto porque a geometria do apalpador limita a medida nos cantos vivos. A visualização de como a rotina lê os dados e calcula a distância pode ser visto na Fig. 4b. As três retas indicam o perfil médio calculado a partir de uma regressão linear de cada região do perfil.

A porção de contração $S(\%)$ das dimensões da geometria é calculada com a Eq. 1 a partir dos dados experimentais $L_i(\text{mm})$ na direção i e o valor nominal $L_n(\text{mm})$ do modelo STL :

$$S\% = \frac{L_n - L_i}{L_n} \cdot 100 \quad (1)$$



(a) Perfil bruto obtido pelo perfilômetro.



(b) Perfil corrigido com o algoritmo.

Figura 4: Perfis da para avaliação

3. Resultados Experimentais

3.1 Dimensões e Contração

Os resultados medidos das dimensões x e y encontradas em cada elemento fabricado são apresentados na Tabela 2 e na Tabela 3, respectivamente, onde são apresentadas as contrações

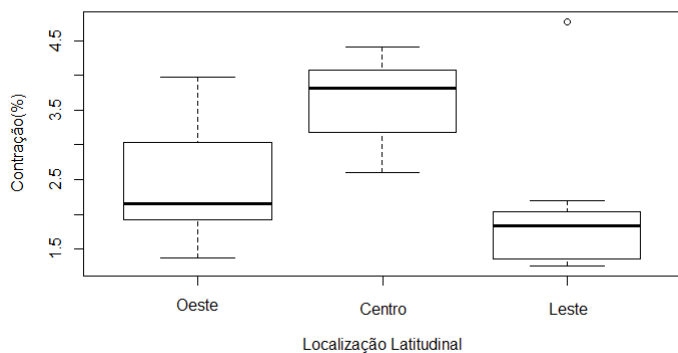
Tabela 2: Dimensões L_x e Contrações S_x (mm)

Fator Longitude	Fator Latitude								
	Oeste (+1)			Centro (0)			Leste (-1)		
$L_x (+1)$	3,4280	3,4327	3,3935	3,3491	3,4091	3,3457	3,4525	3,4560	3,4361
S_x	2,06	1,92	3,04	4,31	2,60	4,41	1,36	1,26	1,83
$L_x (0)$	3,3848	3,4522	3,3606	3,3976	3,3795	3,3576	3,4285	3,4525	3,3332
S_x	3,29	1,37	3,98	2,93	3,44	4,07	2,04	1,36	4,77
$L_x (-1)$	3,3938	3,4496	3,4246	3,3665	3,3886	3,3613	3,4230	3,4332	3,4427
S_x	3,03	1,44	2,15	3,81	3,18	3,96	2,20	1,91	1,64

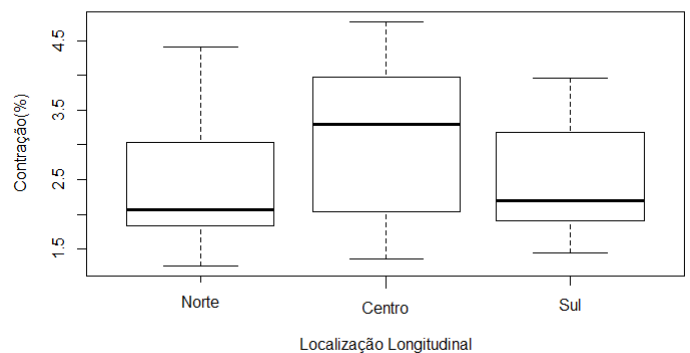
Tabela 3: Dimensões L_y e Contrações S_y (mm)

Fator Longitude	Fator Latitude								
	Oeste(+1)			Centro(0)			Leste(-1)		
L_y (+1)	3,3726	3,3555	3,3671	3,3537	3,4176	3,3347	3,3839	3,3946	3,3870
S_y	3,64	4,13	3,80	4,18	2,35	4,72	3,32	3,01	3,23
L_y (0)	3,3843	3,4060	3,3601	3,4012	3,4170	3,3656	3,3864	3,4200	3,3920
S_y	3,31	2,69	4,00	2,82	2,37	3,84	3,25	2,29	3,09
L_y (-1)	3,4001	3,4222	3,3984	3,4110	3,4306	3,3756	3,4110	3,4432	3,4341
S_y	2,85	2,22	2,90	2,54	1,98	3,55	2,54	1,62	1,88

Para ilustrar a distribuição dos dados experimentais da contração para cada fator e seus respectivos níveis, dois gráficos em formato *boxplots* são demonstrados nas Figs 5, para direção x e na Fig. 6.



(a) Resultados de S_x separados por fator latitude



(b) Resultados de S_x separados por fator longitude

Figura 5: Resultados de S_x

3.2 Análise de Variância

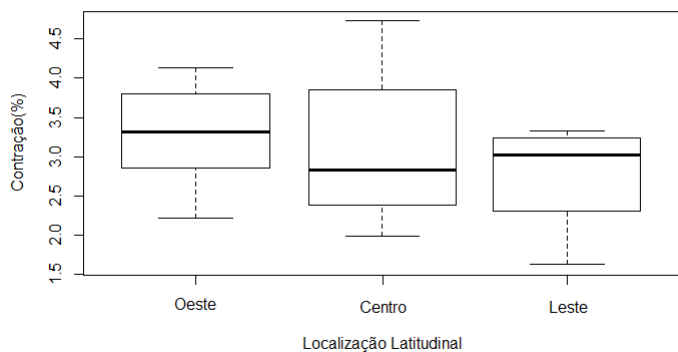
Para cada orientação, foi realizada uma análise de variância com o auxílio do software R, incluindo os dois fatores e suas interações e os 3 níveis descritos. Na Tabela 4 é apresentada a tabela ANOVA correspondente a dimensão x . Percebe-se que apenas o fator latitude é significativo para a dimensão x das geometrias, pois o valor p é baixo, indicando que pode-se afirmar com 99,45% de confiança que a localização latitudinal da peça na plataforma vai influenciar na dimensão x .

Tabela 4: Tabela ANOVA de dois fatores para a dimensão x

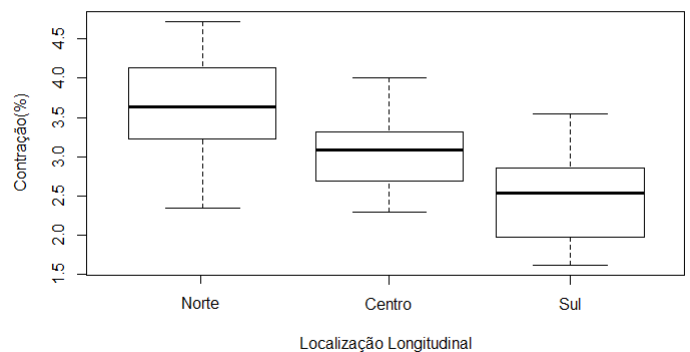
	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrados Médios	F	valor p
Longitude	2	1,319	0,660	0,761	0,4815
Latitude	2	12,211	6,106	7,048	0,0055
Interação (Latitude e Longitude)	4	1,950	0,487	0,563	0,6928
Erro	18	15,593	0,866		
Total	26	31,073			

Sabendo que o fator latitude apresenta influência na contração de dimensões paralelas ao plano zx , pode-se perceber através da distribuição da Figura 5a que peças localizadas no centro latitudinal da plataforma tendem a apresentar maior contração na dimensão x . Por sua vez, na Figura 5b percebe-se que as distribuições próximas uma das outras, confirmando a ANOVA que diz que o fator longitude não influencia na contração da dimensão x .

A partir da Tabela 5, é possível inferir que apenas o fator longitude é significativo para a dimensão y das geometrias, pois o valor p é baixo, levando a dizer com 99,38% de confiança que a localização longitudinal da peça na plataforma vai influenciar na dimensão y .



(a) Resultados de S_y separados por fator latitude



(b) Resultados de S_y separados por fator longitude

Figura 6: Resultados de S_y

Tabela 5: Tabela ANOVA de dois fatores para a dimensão y

	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrados Médios	F	valor p
Longitude	2	5,908	2,954	6,827	0,00622
Latitude	2	1,725	0,863	1,994	0,16510
Interação (Latitude e Longitude)	4	0,256	0,064	0,148	0,96156
Erro	18	7,787	0,433		
Total	26	15,676			

O fator longitude apresenta influência na contração de dimensões ortogonais ao plano zx , e portanto, pode-se perceber na Figura 6b que peças localizadas no norte longitudinal da plataforma tendem a apresentar maior contração na dimensão y . Por sua vez, a Figura 6a tem suas distribuições próximas uma das outras, confirmando a ANOVA que diz que o fator latitude não influencia na contração da dimensão y .

4. Conclusões

Esse artigo abordou a influência que diferentes localizações na plataforma poderiam afetar as dimensões x e y de uma peça fabricada por SLA. O modelo do corpo de prova para ser fabricado consistiu de uma base com 9 cruzeiros como forma geométrica localizadas em diferentes regiões desta base. Depois da fabricação de 3 peças idênticas, foi realizada avaliação das dimensões x e y das peças fabricadas. Para a análise da contração sob a influência da localização na plataforma, foi feita uma ANOVA de dois fatores, sendo esses fatores a localização latitudinal e longitudinal da cruz sobre a plataforma de impressão.

A partir da análise realizada, pode-se concluir que:

- o fator latitude foi o único que apresentou influência sobre a contração na dimensão x ;
- o fator longitude foi o único que apresentou influência sobre a contração na dimensão y ;
- a interação entre os dois fatores não apresentou influência significativa ;
- dimensões x localizadas no centro da plataforma apresentaram maior contração;
- dimensões y localizadas no norte da plataforma apresentam maior contração.

Atualmente, não pode-se atribuir uma explicação física para justificar com segurança os resultados experimentais da influência da posição na precisão das dimensões. Contudo, deve-se considerar os resultados experimentais ao projetar a fabricação por SLA. Todos os valores de contração encontrados foram menores que 5% para um elemento de 3 mm de comprimento.

5. REFERÊNCIAS

- Coelho, A.W.F., 2016. “Estudo do processo e da qualidade de peças fabricadas por estereolitografia”. *Projeto Final de Curso de Graduação - Escola Politécnica - POLI-UFRJ*.
- Emami, M.M., Barazandeh, F. and Yaghmaie, F., 2014. “Scanning-projection based stereolithography: Method and structure”. *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 218, pp. 116 – 124. ISSN 0924-4247.
- Huang, Q., Nouri, H., Xu, K., Chen, Y., Sosina, S. and Dasgupta, T., 2014. “Predictive modeling of geometric deviations of 3d printed products - a unified modeling approach for cylindrical and polygon shapes”. In *2014 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*. pp. 25–30.
- Huang, Q., Zhang, J., Sabbaghi, A. and Dasgupta, T., 2015. “Optimal offline compensation of shape shrinkage for three-dimensional printing processes”. *IIE Transactions*, Vol. 47, No. 5, pp. 431–441.
- Ji, L., Chang, W., Cui, M. and Nie, J., 2013. “Photopolymerization kinetics and volume shrinkage of 1,6-hexanediol diacrylate at different temperature”. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, Vol. 252, pp. 216–221.
- Król, M., Dobrzański, L., Reimann, L. and Czaja, I., 2013. “Surface quality in selective laser melting of metal powders”. *International Scientific Journal*, Vol. 60, No. 2, pp. 87 – 92.
- Luan, H. and Huang, Q., 2015. “Predictive modeling of in-plane geometric deviation for 3d printed freeform products”. In *2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*. pp. 912–917.
- Wang, W., Cheah, C., Fuh, J. and Lu, L., 1996. “Influence of process parameters on stereolithography part shrinkage”. *Materials and Design*, Vol. 17, No. 4, pp. 205 – 213. ISSN 0261-3069.
- Zhou, J.G., Herscovici, D. and Chen, C.C., 2000. “Parametric process optimization to improve the accuracy of rapid prototyped stereolithography parts”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, , No. 40, pp. 363–379.

SHRINKAGE ANALYSIS IN PARTS MANUFACTURED BY STEREOLITHOGRAPHY AT DIFFERENT LOCATIONS AND DIFFERENT ORIENTATIONS.

Arthur Wilson Fonseca Coelho, awf.coelho@mecanica.ufrj.br¹

Anna Carla Monteiro Araujo, anna@mecanica.ufrj.br¹

Rossana Mara Thiré, rossana@metalmat.ufrj.br²

¹ Programa de Engenharia Mecânica - COPPE/UFRJ

² Programa de Engenharia de Materiais e Metalurgia - COPPE/UFRJ

Abstract: Stereolithography is one of the most used processes of additive manufacturing. It uses a liquid resin as raw material, and a curing reaction changes a layer of this resin to solid state, as any kind of manufacturing process, it has its limitations. Among all limitations, the shrinkage in parts manufactured by Stereolithography is the most common phenomenon. To minimize it, it is very important to know which parameters involved in the process of manufacturing can affect the amount of shrinkage in the printed parts. In this article, the shrinkage of dimensions of parts different oriented and different located is analyzed by the technique of two-way analysis of variance (ANOVA). According to the results, it was found that the location of the parts on the platform is an important factor according to the orientations of the dimensions of different geometries.

Key-words: Additive Manufacturing, Stereolithography, ANOVA, Shrinkage.