

AVALIAÇÃO DA CONTRAÇÃO DIMENSIONAL EM MANUFATURA ADITIVA DLP COM RESINA FORMLABS 4K UTILIZANDO IMPRESSORA HALOT ONE

DIMENSIONAL SHRINKAGE EVALUATION IN DLP ADDITIVE MANUFACTURING USING FORMLABS 4K RESIN AND THE HALOT ONE PRINTER

Marcos Roberto Barbosa^{1, i}
Cesar Aparecido Barbosa^{2, ii}
Gilderlon Fernandes Oliveira^{3, iii}

RESUMO

A manufatura aditiva por Digital Light Processing (DLP) permite a produção de peças com alta precisão e acabamento, porém sofre influência da contração dimensional durante a cura fotopolimérica. Este estudo avaliou o efeito da orientação de impressão (longitudinal, transversal e oblíqua) e da dimensão nominal (4, 8 e 60 mm) sobre a contração de corpos de prova fabricados com resina Formlabs Rigid 4K em impressora Creality Halot One. Utilizando metodologia baseada na ISO 17296-3:2014, foram realizadas medições e análises estatísticas. Os resultados indicaram efeito significativo apenas da dimensão nominal, com contração decrescente em peças maiores. A orientação oblíqua apresentou maior estabilidade, sugerindo potencial para aplicações que demandam uniformidade dimensional.

Palavras-chave: Manufatura aditiva; Digital Light Processing; Contração dimensional; Precisão dimensional; Resina fotopolimérica.

ABSTRACT

Additive manufacturing via Digital Light Processing (DLP) enables the production of components with high precision and surface quality; however, it is affected by dimensional shrinkage during photopolymerization. This study evaluated the effect of build orientation (longitudinal, transverse, and oblique) and nominal dimension (4, 8, and 60 mm) on the shrinkage of test specimens manufactured with Formlabs Rigid 4K resin using a Creality Halot One printer. Following the ISO 17296-3:2014 standard, dimensional measurements and statistical analyses were performed. Results indicated a significant effect only for nominal dimension, with shrinkage decreasing for larger parts. The oblique orientation exhibited greater dimensional stability, suggesting potential for applications requiring high dimensional uniformity.

Keywords: Additive manufacturing; Digital Light Processing; Dimensional shrinkage; Dimensional accuracy; Photopolymer resin.

1 INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva, ou impressão 3D, consolidou-se como tecnologia

¹ Pós-graduando em Engenharia da Qualidade e Produtividade no Centro Universitário SENAI São Paulo - Campus Senai Suíço-Brasileira Paulo Ernesto Tolle – Santo Amaro – SP. E-mail: marcosrobertob@terra.com.br

² Especialista em Engenharia de Produção, docente (instrutor) no SENAI-SP em Gestão de Projetos, Processos e Manutenção Industrial. E-mail: cesar.barbosa@sp.senai.br

³ Docente e Mestre em Ciências no Centro Universitário SENAI São Paulo - Campus Senai Suíço-Brasileira Paulo Ernesto Tolle – Santo Amaro – SP. E-mail: gilderlon.oliveira@sp.senai.br

estratégica para a produção de protótipos e peças funcionais, oferecendo liberdade de design, customização e significativa redução de tempo e custos em relação aos métodos tradicionais (Alparslan; Bayraktar, 2025). Entre as tecnologias existentes, o *Digital Light Processing* (DLP) destaca-se por alta resolução e excelente acabamento superficial, sendo amplamente utilizado nos setores médico, odontológico e automotivo, onde tolerâncias dimensionais rigorosas são essenciais ao desempenho e à segurança (Chaudhary et al., 2022).

Apesar dessas vantagens, um desafio recorrente no DLP é a variação dimensional provocada pela contração do material durante a cura fotopolimérica, capaz de comprometer a precisão e a funcionalidade das peças (Swetha et al., 2024). Estudos indicam que essa contração apresenta comportamento anisotrópico, influenciado por variáveis como orientação de impressão, espessura de camada e regime de pós-cura (Brinckmann et al., 2022; Jafarpour et al., 2025).

Até o momento, não foram identificados trabalhos que investiguem sistematicamente a influência da orientação de impressão na contração dimensional de peças fabricadas com a resina 4K da *Formlabs* em impressoras *Creality Halot One*. Essa lacuna é relevante, pois dificulta a definição de parâmetros otimizados para equipamentos de menor custo destinados à produção de peças que demandam elevada exatidão dimensional.

Assim, este estudo busca responder: como a orientação de impressão e a dimensão nominal influenciam a contração e, por consequência, a precisão final das peças fabricadas com resina 4K da *Formlabs* em impressoras de baixo custo? O objetivo geral é quantificar a variação de contração e identificar padrões associados às variáveis de processo, oferecendo recomendações práticas para fabricar peças com tolerâncias compatíveis às exigências de setores críticos, como o médico e o automotivo. Avaliando experimentalmente o efeito da orientação (longitudinal, transversal, oblíqua) e da dimensão nominal (4 mm, 8 mm, 60 mm) na contração dimensional de corpos de prova.

2 REVISÃO DE LITERATURA

O processo de impressão 3D por Digital Light Processing (DLP) tem despertado crescente interesse em função de sua capacidade de produzir geometrias complexas com elevada fidelidade e precisão, atendendo a setores que demandam tolerâncias rigorosas e qualidade superficial superior (Louredo et al., 2021; Oliveira; Rodrigues; Finck, 2023; Inácio et al., 2020). A tecnologia baseia-se na fotopolimerização sequencial de camadas, o que possibilita alto nível de detalhamento, mas pode induzir variações dimensionais e efeitos anisotrópicos decorrentes do próprio mecanismo de cura (Beserra et al., 2024).

A anisotropia em peças DLP manifesta-se como diferenças nas propriedades mecânicas e físicas em função da direção de fabricação. Esse fenômeno é influenciado por parâmetros como espessura de camada, tempo de exposição e profundidade de cura, que afetam a adesão intercamadas (Zhu et al., 2022). Tal sensibilidade processual torna o controle de parâmetros etapa crítica para garantir estabilidade dimensional e repetibilidade (Balbinot et al., 2022). Diversas estratégias têm sido propostas para minimizar anisotropia e variação dimensional. Entre elas, destacam-se modificações na formulação de resinas, incluindo ajustes moleculares em oligômeros (Bokhari et al., 2025), uso de gradientes de materiais (Nam; Kim, 2024) e impressão em escala de cinza para controle de exposição (Gholami et al., 2024). A incorporação de cargas funcionais, como nanotubos de carbono e óxido de grafeno

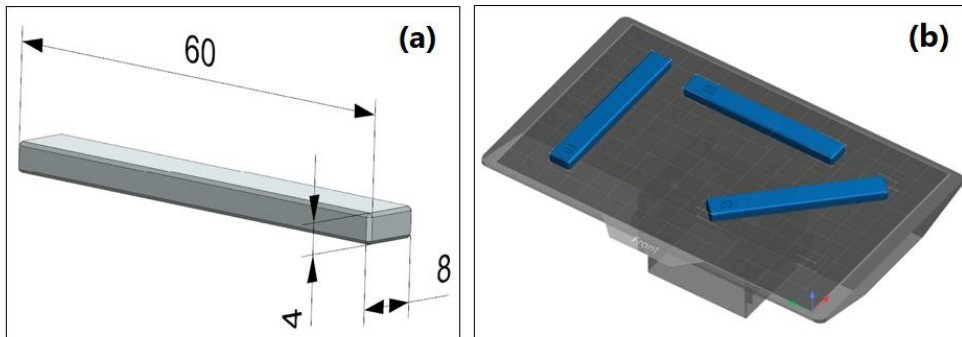
(Nguyen et al., 2024), também apresenta potencial para aumentar resistência mecânica e condutividade, preservando a integridade estrutural.

Apesar dos avanços, observa-se lacuna na literatura quanto à análise integrada da interação entre orientação de impressão e dimensão nominal sobre a contração dimensional em DLP, especialmente para resinas específicas e equipamentos de baixo custo. Essa ausência de dados reforça a necessidade de estudos que correlacionem variáveis operacionais e desempenho dimensional, estabelecendo diretrizes técnicas aplicáveis a diferentes contextos produtivos.

3 METODOLOGIA

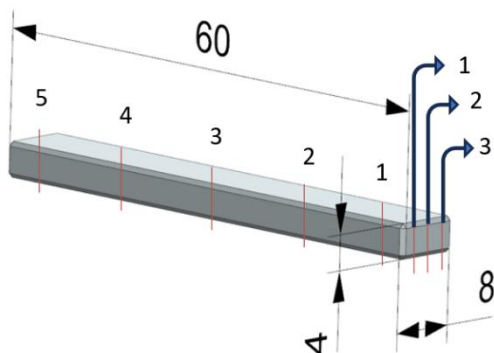
Este estudo avaliou a contração dimensional de corpos de prova fabricados por manufatura aditiva no processo Digital Light Processing (DLP), utilizando impressora Creality Halot One e resina Formlabs Rigid 4K. O corpo de prova foi modelado no software Siemens NX como um prisma retangular de 60 mm × 8 mm × 4 mm (Figura 1 - a), formato recomendado por sua simplicidade geométrica e facilidade de medição. A ISO 17296-3:2014 foi utilizada como referência central, pois estabelece métodos para avaliação de características de peças obtidas por manufatura aditiva, incluindo precisão dimensional e estabilidade. Essa norma garante que o procedimento adote critérios padronizados, permitindo a comparação dos resultados com outros estudos e aplicações industriais.

Figura 1: (a) Modelo CAD do corpo de prova (60 mm x 8 mm x 4 mm) no Siemens NX. (b) Disposição dos corpos de prova na plataforma de impressão da HALOT ONE no software Chitubox Pro



Fonte: Autor

Figura 2: Sequência de medição e quantidade por lado.



Fonte: Autor

A preparação incluiu calibração prévia da resina e da impressora por meio de corpo de prova de validação, ajustando parâmetros no software *Chitubox Pro v2.0.8*. Após testes preliminares, o tempo de exposição ideal foi definido em 30 s, assegurando melhor resolução e qualidade superficial. Os parâmetros finais incluíram altura de camada de 0,05 mm, oito camadas de base e velocidades de elevação/retração de 60 mm/min.

As amostras foram posicionadas na plataforma em três orientações (longitudinal, transversal e oblíquo), impressas em três lotes (Figura 1 - b) e, posteriormente, lavadas em álcool isopropílico por 15 minutos e submetidas à pós-cura UV de 15 minutos na *Creality UW-01*. As medições dimensionais foram realizadas com paquímetro digital calibrado (resolução de 0,01 mm), em ambiente controlado a 20 ± 2 °C. Cada dimensão foi medida em pontos específicos: cinco para espessura, cinco para largura e três para comprimento, conforme sequência ilustrada na Figura 2. Em seguida a contração percentual foi determinada pela equação 1.

$$\text{Contração (\%)} = \frac{\text{Dimensão Nominal (CAD)} - \text{Dimensão Medida}}{\text{Dimensão Nominal (CAD)}} \times 100 \quad (1)$$

Os dados médios de cada lote e orientação foram processados e analisados no Minitab 18, com cálculo de média, desvio-padrão e comparação estatística entre configurações, permitindo avaliar a influência da orientação de impressão na contração dimensional.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 apresenta as médias e desvios-padrão da contração percentual dos corpos de prova em função da orientação de impressão e da dimensão nominal. Observa-se que as peças com dimensão nominal de 4 mm apresentaram maiores valores médios de contração, destacando-se a orientação transversal (1,82%) e longitudinal (1,57%). Já as dimensões de 8 mm exibiram contrações mais reduzidas e próximas entre si (~0,3%), enquanto as peças de 60 mm apresentaram valores médios negativos, indicando leve expansão dimensional (-0,18% a -0,19%). Nota-se também que a variabilidade (desvio-padrão) foi mais acentuada nas peças menores, especialmente na dimensão de 4 mm em orientação longitudinal (2,10%).

Tabela 1: Médias e desvios-padrão da contração (%) por orientação e dimensão nominal

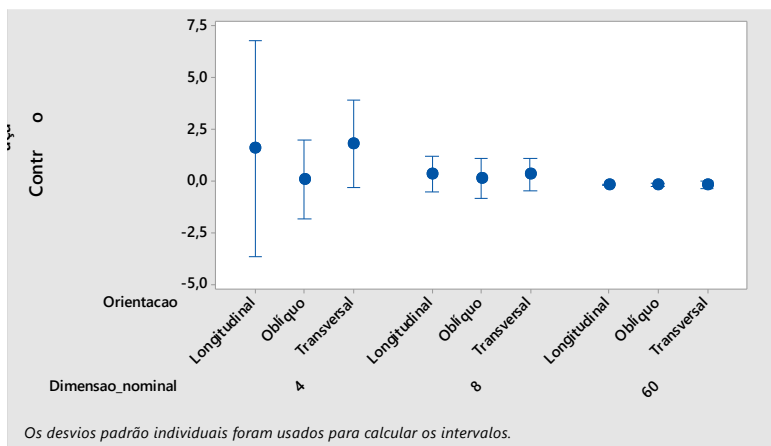
Orientação	Dimensão Nominal	Média (%)	Desvio Padrão (%)
Longitudinal	4	1,57	2,10
Longitudinal	8	0,35	0,35
Longitudinal	60	-0,19	0,02
Oblíquo	4	0,08	0,77
Oblíquo	8	0,13	0,38
Oblíquo	60	-0,19	0,03
Transversal	4	1,82	0,85

Transversal	8	0,32	0,32
Transversal	60	-0,18	0,07

Fonte: Autor

A análise estatística pelo Modelo Linear Generalizado (Figura 3) indicou efeito significativo apenas para o fator dimensão nominal ($p = 0,009$), enquanto a orientação de impressão ($p = 0,222$) e a interação entre os fatores ($p = 0,363$) não apresentaram significância estatística. Esses resultados são reforçados pelo gráfico de intervalos de contração (Figura 3), no qual é possível observar ampla sobreposição dos intervalos de confiança entre as orientações, especialmente para as dimensões de 8 mm e 60 mm, ao passo que a dimensão nominal de 4 mm apresenta maior dispersão. Esse comportamento visualmente confirma que a escala da peça exerce influência mais determinante na contração dimensional que a orientação de impressão, em contraste com estudos prévios que apontam forte anisotropia em processos DLP (Brinckmann et al., 2022; Jafarpour et al., 2025).

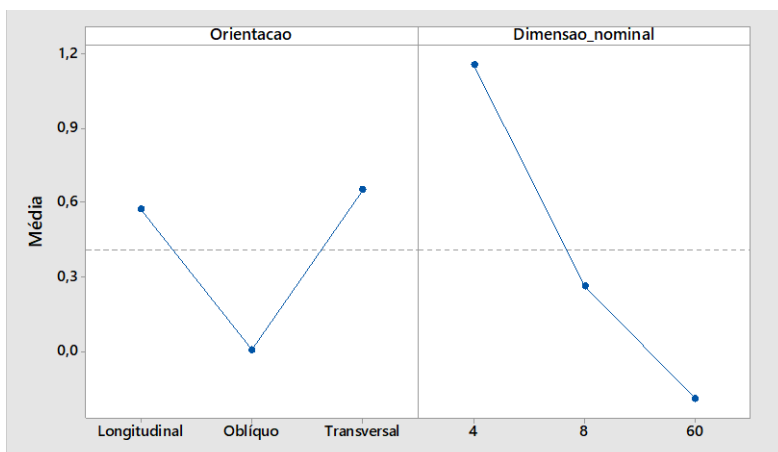
Figura 3: Gráfico de intervalos de contração com intervalo de confiança de 95% para média.



Fonte: Autor

O gráfico de efeitos principais (Figura 4) evidencia que a dimensão nominal exerce influência mais acentuada na contração que a orientação de impressão. Observa-se que peças de 4 mm apresentam maior média de contração (~1,16%), enquanto dimensões de 8 mm e 60 mm apresentam valores progressivamente menores, sendo que a última resulta em leve expansão. Essa tendência é confirmada pela correlação de Pearson ($r = -0,455$; $p = 0,017$), que indica relação negativa moderada entre a dimensão nominal e a contração: à medida que a dimensão aumenta, a contração tende a diminuir. Embora a orientação não tenha apresentado significância estatística, nota-se que a configuração oblíqua apresenta média próxima de zero e menor variação (ver Figura 4), sugerindo comportamento dimensional mais estável. Em contextos de aplicações críticas, em que a uniformidade das medidas é mais relevante que a magnitude absoluta da contração, essa orientação pode ser preferível. Esse comportamento pode estar associado à relação entre área superficial e volume, que influencia a dissipação de calor e a dinâmica de contração durante a fotopolimerização e o processo de pós-cura.

Figura 4: Gráfico de efeitos principais para contração – Média dos dados.



Fonte: Autor

Os resultados dialogam com a revisão de literatura ao confirmar que a dimensão nominal é uma variável crítica no controle dimensional em DLP, embora a magnitude do efeito da orientação possa variar em função do equipamento, parâmetros de impressão e formulação da resina. Como limitações, o presente estudo não investigou parâmetros como espessura de camada, tempo de exposição e variações no pós-processamento, que podem interagir com os fatores analisados. Sugere-se que trabalhos futuros incluam análise de repetibilidade e reprodutibilidade (Gage R&R), avaliação do posicionamento na plataforma, comparação entre diferentes resinas e inclusão de geometrias mais complexas, visando ampliar a aplicabilidade dos resultados.

5 CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou que, na impressão 3D por DLP utilizando resina *Formlabs Rigid 4K* em impressora *Crealty Halot One*, a dimensão nominal exerce influência significativa sobre a contração dimensional, enquanto a orientação de impressão não apresentou efeito estatisticamente relevante. Peças menores (4 mm) tendem a contrair mais, e peças maiores (60 mm) apresentaram leve expansão, evidenciando relação negativa moderada entre dimensão e contração. Embora não significativa, a orientação oblíqua apresentou maior estabilidade dimensional, podendo ser vantajosa em aplicações críticas. Esses resultados contribuem para o ajuste de parâmetros visando maior precisão em setores que demandam tolerâncias rigorosas, como o médico e o automotivo, e reforçam a importância de estudos futuros explorando outros fatores de processo.

REFERÊNCIAS

ALPARSLAN, Cem; BAYRAKTAR, Şenol. Advances in Digital Light Processing (DLP) Bioprinting: a review of biomaterials and its applications, innovations, challenges, and future perspectives. *Polymers*, [S.l.], v. 17, n. 9, p. 1287, 7 maio 2025. MDPI AG. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym17091287>.

BALBINOT, Guilherme; LEITUNE, Vanessa; GUERREIRO, Guilherme; COLLARES, Felipe; BONA, Álvaro. Grau de conversão na impressão 3D de

modelos: efeito de diferentes parâmetros de impressão. *Journal of Clinical Dentistry and Research*, v. 19, n. 2, p. 96-103, 2022. DOI: <https://doi.org/10.14436/2447-911x.19.2.096-103.art>.

BESERRA, Vanessa; CARMO, André; MAGALHÃES, Amanda; OLIVEIRA, Tiago; PORTO, Ewerton; HELFENSTEIN, Alexandre. Comparação entre placas estabilizadoras produzidas por impressão 3D e o método convencional: uma revisão integrativa de literatura. *Revista da Faculdade de Odontologia da Universidade Federal da Bahia*, v. 54, n. 1, e542402, 2024. DOI: <https://doi.org/10.9771/revfo.v54i1.59203>.

BOKHARI, Syed; SEVENING, Joshua; CATCHMARK, Jeffrey; CHMELY, Stephen. Tuneable mechanics in 3D printing: molecular design of UV-curable bio-based oligoesters. *RSC Applied Polymers*, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1039/d5lp00085h>.

BRINCKMANN, S. A. et al. Effect of print direction on mechanical properties of 3D printed polymer-derived ceramics and their precursors. *Materials Letters: X*, v. 17, 100179, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mlblux.2022.100179>.

CHAUDHARY, Rajat; FABBRI, Paride; LEONI, Enrico; MAZZANTI, Francesca; AKBARI, Raziye; ANTONINI, Carlo. Additive manufacturing by digital light processing: a review. *Progress In Additive Manufacturing*, [S.l.], v. 8, n. 2, p. 331-351, 25 ago. 2022. Springer Science and Business Media LLC. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00336-0>.

GHOLAMI, Farzad; YUE, Lian; LI, Min; JAIN, Ankit; MAHMOOD, Amer; FRATARCANGELI, Marco; FENG, Qian; PARK, Min-Kyu; WANG, Kai; PAN, Zhigeng; MA, Yi; KIM, Joo-Hyung; XU, Sheng; CHOI, Byoung-Chul; WANG, Lei; PARK, Joon; CHOI, Hongsoo; LEE, Min-Ho; LEE, Seong-Dae; PARK, Byung-Seong; JEON, Seokwoo; LEE, Kyoung-ho; LEE, Dongseok. Fast and efficient fabrication of functional electronic devices through grayscale digital light processing 3D printing. *Advanced Materials*, v. 36, n. 46, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.202408774>.

INÁCIO, Diego; DROZDA, Felipe; SILVA, Willian; MARQUES, Mário; SELEME, Robson. A importância da manufatura aditiva como tecnologia digital para a indústria 4.0: uma revisão sistemática. *Revista Competitividade e Sustentabilidade*, v. 7, n. 3, p. 653-667, 2020. DOI: <https://doi.org/10.48075/comsus.v7i3.23861>.

ISO 17296-3:2014. Additive manufacturing - General principles - Part 3: Main characteristics and corresponding test methods. International Organization for Standardization, 2014.

JAFARPOUR, D. et al. Effects of DLP printing orientation and postprocessing regimes on the properties of 3D printed denture bases. *Journal of Prosthetic Dentistry*, v. 134, n. 1, p. 239.e1-239.e9, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2025.02.035>.

LOUREDO, Lucas; DUARTE, Matheus; ARAÚJO, Mariana; LOUREDO, João; ARRUDA, João. Uso de prototipagem rápida ou manufatura aditiva para estudos de

casos clínicos e planejamento de técnica cirúrgica utilizando modelos 3D. *Research Society and Development*, v. 10, n. 12, e336101220403, 2021. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i12.20403>.

NAM, Jihyun; KIM, Minseok. Advances in materials and technologies for digital light processing 3D printing. *Nano Convergence*, v. 11, n. 1, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40580-024-00452-3>.

NGUYEN, Minh; KIM, Jisoo; JANG, Woojin; JUNG, Yongwoo; PARK, Eunji; HA, Tae; HONG, Sangho; LEE, Hyunwoo; KIM, Hyejin; KIM, Younghwan. Role of GO and photoinitiator concentration on curing behavior of PEG-based polymer for DLP 3D printing. *ACS Omega*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c05378>.

OLIVEIRA, Juliana; RODRIGUES, Lucas; FINCK, Nicole. O fluxo de trabalho e a aplicação da impressão 3D na odontologia. *Revista Eletrônica Acervo Saúde*, v. 23, n. 5, e12747, 2023. DOI: <https://doi.org/10.25248/reas.e12747.2023>.

SWETHA, S.; SAHITI, T. J.; PRIYA, G. S. et al. Review on digital light processing (DLP) and effect of printing parameters on quality of print. *Interactions*, v. 245, p. 178, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10751-024-02018-5>.

ZHU, Guanglei; HOU, Yujing; XU, Jun; ZHAO, Nan. Digital light processing 3D printing of enhanced polymers via interlayer welding. *Macromolecular Rapid Communications*, v. 43, n. 9, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/marc.202200053>.

Sobre os autores:

MARCOS ROBERTO BARBOSA



Pós-Graduando em Engenharia da Qualidade e Produtividade pela Escola e Faculdade de Tecnologia SENAI Suíço-Brasileira “Paulo Ernesto Tolle”, Pós-Graduado em Engenharia de Polímeros pela Faculdade de Tecnologia SENAI “Mario Amato” (2022), Pós-graduado em Gestão de Projetos pela Universidade São Judas Tadeu (2014). Tecnólogo em Polímeros pela Faculdade Oswaldo Cruz (2005). Técnico em Plásticos pela Escola SENAI “Mario Amato” (2002) e Técnico em Desenho de Projetos pela Escola SENAI “Roberto Simonsen (2000)”. Possui mais de 20 anos de experiência nas áreas da Metalmeccânica, Metalurgia e Plásticos, atuando no Desenvolvimento de Produtos, Projetos Mecânicos e Projetos de Moldes de Injeção para Plásticos.

ii **CESAR APARECIDO BARBOSA**



Especialista em Manufatura Aditiva, com formação técnica em Mecânica e Plásticos (SENAI-SP), tecnólogo em Gestão da Produção (UNINTER) e pós-graduação em Engenharia de Produção (Universidade Candido Mendes) e em Gestão e Educação Profissional e Tecnológica (Faculdade Campos Elísios). Atualmente é instrutor no SENAI-SP nas áreas de Metalmecânica, Plásticos e Manufatura Aditiva (FDM, SLA/DLP), com foco em Desenvolvimento de Produtos e Processos na pós-graduação. Atua também como diretor técnico no grupo Sinergia, desenvolvendo projetos e processos em manufatura aditiva com uso de ferramentas CAD/CAE/CAM.

iii **GILDERLON FERNANDES OLIVEIRA**



Possui Mestrado em Ciências (2014) e Bacharelado e Física (2009) pelo Instituto de Física da Universidade de São Paulo. Atualmente cursa especialização em Moderna Educação pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. E atua como docente na Escola e Faculdade de Tecnologia SENA Suíço-Brasileira “Paulo Ernesto Tolle”.

<https://orcid.org/0000-0002-7607-1732>