

HEMANI ALVES FURFURO DE SOUZA

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO
DE POLÍMERO ABS NA IMPRESSÃO 3D**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, para obtenção do título de Magister Scientiae.

Orientadora: Andressa Carmo Pena Martinez

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2020**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da
Universidade Federal de Viçosa - Campus
Viçosa**

T

S729a Souza, Hemani Alves Furfuro de, 1993-
2020 Avaliação do comportamento mecânico de polímero ABS
na impressão 3D / Hemani Alves Furfuro de Souza. – Viçosa,
MG, 2020.

147 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexos.

Orientador: Andressa Carmo Pena Martinez.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.86-90.

1. Manufatura aditiva. 2. Impressão tridimensional.
3. Polímeros. 4. Resistência de materiais - Testes.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Arquitetura
e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e
Urbanismo. II. Título.

CDD 22. ed. 670

HEMANI ALVES FURFURO DE SOUZA

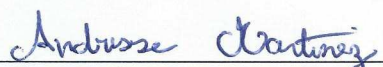
AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO
DE POLÍMERO ABS NA IMPRESSÃO 3D

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós- Graduação em Arquitetura e Urbanismo, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 28 de fevereiro de 2020.

Assentimento:


Hemaní Alves Furfuro de Souza
Autor


Andressa Carmo Pena Martínez
Orientadora

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pois cada momento e cada oportunidade moldou-me e tornou-me uma pessoa melhor. Tenham sido as dificuldades ou as inúmeras alegrias, todas inegavelmente foram dádivas que tentei abraçar e ser grato.

Agradeço e dedico tudo que tenho e terei à minha família, que é exemplo de amor, apoio, dedicação, trabalho e ética. À minha mãe Márcia (*In memoriam*), ao meu pai Marconi (*In memoriam*) e a minha irmã Sophia.

As minhas avós Marilene e Rina, aos meus avôs Altivo (*In memoriam*) e Fontgallanant (*In memoriam*). A todas minhas tias e tios, em especial Ecila e Giovani. A todas minhas primas e primos, em especial Gabriela e Gabriel.

A Universidade Federal de Viçosa e seus profissionais de todos os segmentos pelos quais passei: Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e ao NÓ.Lab. Agradeço especialmente a minha orientadora Andressa Martinez, aos professores Leonardo Pedroti, Túlio Tibúrcio e a todos os professores que me auxiliaram nessa jornada.

É necessário agradecer aos meus amigos e amigas que tornam toda alegria mais festiva e toda tristeza mais amena, vocês são meus tesouros e minhas conquistas mais valiosas.

Muito obrigado!!!

“Ainda tenho muito a aprender, mas tenho confiança”.

“No futuro, ser arquiteto também significa ser um construtor”.

“Com a sabedoria constrói-se a casa e com a prudência ela se consolida”.

UFV, sentirei saudades!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG – Código de Financiamento 001.

RESUMO

SOUZA, Hemani Alves Furfuro, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2020.
Avaliação do Comportamento Mecânico de Polímero ABS na Impressão 3D.
Orientadora: Andressa Carmo Pena Martinez.

As técnicas e os materiais que são aplicados na manufatura aditiva estão passando por um processo de transformação nos últimos anos, onde suas aplicações nas áreas de arquitetura, engenharia e construção (AEC), vêm crescendo e ganhando novos horizontes. No entanto, o custo do material, aliados às limitações da produção e dimensões dos modelos, bem como a performance estrutural ainda impedem o impacto significativo na produção de componentes para edificações. O objetivo desta pesquisa, baseia-se na avaliação do comportamento mecânico do polímero ABS na impressão 3D, trazendo comparações, ensaios mecânicos e simulações de corpos de prova (CPs) impressos e também análises microscópicas das fibras internas dos modelos. Nesse sentido, as análises inicialmente arroladas promoveram a comprovação da eficiência mecânica através de ensaios destrutivos nos CPs. Os modelos testados mostraram-se resistentes fisicamente, tendo em vista os ensaios reais, as simulações e as variações dos pontos principais característicos em cada modelo. Para os CPs menores a diferença entre os modelos maciços e de malha foi superior a 50% em seu desempenho mecânico, já nos modelos maiores essa diferença diminuiu para valores próximos a 20%. A simulação mostrou ser uma ferramenta útil nas análises estruturais, porém é necessário que mais estudos sejam realizados a respeito da implantação de dados nos programas utilizados para que os resultados possam ser mais coesos. A análise microscópica revelou detalhes pertinentes à resistência dos CPs através do comportamento de suas fibras internas. Por fim, o estudo demonstra que a impressão 3D aponta para um caminho promissor na inovação da indústria AEC.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva. Impressão 3D. Polímeros. Performance Estrutural.

ABSTRACT

SOUZA, Hemani Alves Furfuro, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2020.
Evaluation of the Mechanical Behavior of ABS Polymer in 3D Printing.
Advisor: Andressa Carmo Pena Martinez.

The techniques and materials that are used in additive manufacturing are undergoing a transformation process in recent years, where their applications in the areas of architecture, engineering and construction (AEC), have been growing and gaining new horizons. However, the cost of the material, combined with the production limitations and dimensions of the models, as well as the structural performance still prevent the significant impact on the production of building components. The objective of this research is based on the evaluation of the mechanical behavior of the ABS polymer in 3D printing, bringing comparisons, mechanical tests and simulations of printed specimens (CPs) and also microscopic analyzes of the internal fibers of the models. In this sense, the analyzes initially listed promoted the proof of mechanical efficiency through destructive tests on CPs. The tested models proved to be physically resistant, considering the real tests, the simulations and the variations of the main characteristic points in each model. For the smaller CPs, the difference between the solid and mesh models was greater than 50% in their mechanical performance, whereas in the larger models this difference decreases to values close to 20%. The simulation has proved to be a useful tool in structural analysis, but it is necessary that more studies be carried out regarding the implementation of data in the programs used so that the results can be more cohesive. The microscopic analysis revealed details pertinent to the resistance of the CPs through the behavior of its internal fibers. Finally, the study demonstrates that 3D printing points to a promising path in AEC industry innovation.

Keywords: Additive Manufacturing. 3D Printing. Polymers. Structural Performance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Modelo de casa fabricado pelo equipamento A.....	24
Figura 2: Um mapa de relevo fabricado pelo equipamento B.....	25
Figura 3: Um exemplo de modelo sólido fabricado pelo equipamento C.....	25
Figura 4: Processo FDM.....	28
Figura 5: Processo de impressão da Zortrax.....	30
Figura 6: Impressão de um CP.....	42
Figura 7: CPs e processo.....	43
Figura 8: Codificação do CP.....	44
Figura 9: Máquina de ensaio mecânico.....	46
Figura 10: Ensaio na EMIC.....	47
Figura 11: Extensômetros encaixados no CP para ensaio.....	48
Figura 12: CPs após os cortes.....	54
Figura 13: Processo de corte do CP Z10A09-100.....	55
Figura 14: Separação das peças do CP Z10A09-100.....	56
Figura 15: Régua de calibração microscópica.....	56
Figura 16: Régua de calibração sobre o CPs.....	57
Figura 17: CPs 2,5 x 5,0 cm.....	59
Figura 18: Vista frontal dos CPs de 5 cm após ensaio mecânico.....	61
Figura 19: Vista superior dos CPs de 5 cm após ensaio mecânico.....	62
Figura 20: CP Z5A39-50 após ensaio mecânico.....	62
Figura 21: CP Z5A39-100 após ensaio mecânico.....	63
Figura 22: CP Z5A19-50 após ensaio mecânico.....	63
Figura 23: CP Z5A19-100 após ensaio mecânico.....	64
Figura 24: CP Z5A09-50 após ensaio mecânico.....	64

Figura 25: CP Z5A09-100 após ensaio mecânico	65
Figura 26: CP Z10A39-50 após ensaio mecânico	65
Figura 27: CP Z10A19-100 após ensaio mecânico	66
Figura 28: CP Z10A09-100 após ensaio mecânico	66
Figura 29: Resultados do VMS (CPs 10A-100% (CUBEX + ZORTRAX))	77
Figura 30: Fotografia microscópica da parte interna de dois CPs	80
Figura 31: Foto do modelo Z10A09-100 a 2,5 cm de distância do microscópio.....	82

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Principais usos de Fabricação Aditiva (3D).....	27
Gráfico 2: Tempo de impressão dos CPs.....	68
Gráfico 3: Massa em gramas dos CPs.....	69
Gráfico 4: Comparativo (Resistência à compressão) Zortrax X Cubex.....	70
Gráfico 5: Forças aplicadas nos CPs	79

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Dados dos filamentos disponíveis pela Zortrax	37
Quadro 2: Pesquisas sobre reforços em módulos impressos.....	39
Quadro 3: Configurações padrão para impressões dos CPs de teste	42
Quadro 4: CPs impressos na impressora 3D Zortrax.....	44
Quadro 5: CPs impressos na impressora 3D Cubex.....	51
Quadro 6: Separação das fotos dos CPs.....	57
Quadro 7: Resultado dos ensaios nos CPs 2,5 x 5,0 cm	58
Quadro 8: Resultados dos ensaios nos CPs 5,0 x 10,0 cm.....	60
Quadro 9: Comparativo material e tempo de impressão (Zortrax X Cubex)	67
Quadro 10: Comparativo Resistência à Compressão (Zortrax X Cubex).....	69
Quadro 11: Resultados das Medidas de Dispersão dos CPs	72
Quadro 12: Modelo ABS	73
Quadro 13: ABS - ZORTRAX E ENSAIOS.....	73
Quadro 14: Modelo ABS - STANDARD DEVIATION MODEL.....	74
Quadro 15: Comparação do deslocamento Horizontal/Diâmetro e Vertical/Altura.....	76
Quadro 16: Resultados CPs Z5A-50% (ZORTRAX)	78
Quadro 17: Comparativo das fotos no microscópio.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Modelos de CPs para Cubex, por Martinez et al. (2017).	50
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
AEC	Arquitetura, Engenharia e Construção
CP	Corpo de Prova
CPs	Corpos de Prova
ESA	European Space Agency
FDM	Fused Deposition Modeling
GEE	Gases de Efeito Estufa
GPa	Gigapascal
HIPS	Polystyrene (High Impact)
MA	Manufatura Aditiva
MOE	Módulo de elasticidade
MPa	Megapascal
NASA	National Aeronautics and Space Administration
nm	Nanômetro
Pa	Pascal
PET	Polyethylene terephthalate
PLA	Polylactic Acid
SNS	Scan & Solve™
TPU	Thermoplastic polyurethane
UV	Radiação Ultravioleta
VMS	Von Mises Stress

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	15
1.2	OBJETIVOS.....	16
1.2.1	GERAL.....	16
1.2.2	ESPECÍFICOS.....	17
1.3	JUSTIFICATIVA.....	17
1.4	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	18
2.	REVISÃO DE LITERATURA.....	19
2.1	CONCEITUAÇÃO DA PESQUISA.....	19
2.2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
2.3	EVOLUÇÃO DA IMPRESSÃO 3D.....	23
2.4	EXPECTATIVA DE CRESCIMENTO PARA MANUFATURA ADITIVA.....	26
2.5	TIPO DE IMPRESSÃO E MATERIAIS.....	27
2.6	LIMITAÇÕES.....	32
2.7	IMPRESSÃO EM ABS E PLA.....	35
2.8	ALTERNATIVAS PARA MELHORIA DA RESISTÊNCIA MECÂNICA.....	38
3.	METODOLOGIA.....	41
3.1	MATERIAL E MÉTODOS.....	41
3.1.1	PRIMEIRA ETAPA: IMPRESSÃO E ENSAIOS MECÂNICOS.....	41
3.1.2	SEGUNDA ETAPA: COMPARAÇÃO.....	49
3.1.3	TERCEIRA ETAPA: SIMULAÇÃO.....	52
3.1.4	QUARTA ETAPA: ANÁLISE MICROSCÓPICA.....	54

4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
4.1	PRIMEIRA ETAPA: IMPRESSÃO E ENSAIOS MECÂNICOS.....	58
4.2	SEGUNDA ETAPA: COMPARAÇÃO	67
4.3	TERCEIRA ETAPA: SIMULAÇÃO	71
4.4	QUARTA ETAPA: ANÁLISE MICROSCÓPICA.....	80
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	83
	BIBLIOGRAFIA.....	86
	ANEXO 1 - MODELO CPs - 5.0x10.0 cm - 0.39 mm - 100%.....	91
	ANEXO 2 - MODELO CPs - 5.0x10.0 cm - 0.19 mm - 100%.....	92
	ANEXO 3 - MODELO CPs - 5.0x10.0 cm - 0.09 mm - 100%.....	93
	ANEXO 4 - CPs Z5A-50% (ZORTRAX) - ABS.....	94
	ANEXO 5 - CPs Z5A-50% (ZORTRAX) - ABS - STANDARD DEVIATION MODEL	97
	ANEXO 6 - CPs Z5A-50% (ZORTRAX) - ABS - ZORTRAX E ENSAIOS.....	100
	ANEXO 7 - CPs Z5A-100% (ZORTRAX) - ABS.....	103
	ANEXO 8 - CPs Z5A-100% (ZORTRAX) - ABS - STANDARD DEVIATION MODEL ...	106
	ANEXO 9 - CPs Z5A-100% (ZORTRAX) - ABS - ZORTRAX E ENSAIOS.....	109
	ANEXO 10 - CPs Z10A-50% (ZORTRAX) - ABS.....	112
	ANEXO 11 - CPs Z10A-50% (ZORTRAX) - ABS - STANDARD DEVIATION MODEL .	115
	ANEXO 12 - CPs Z10A-50% (ZORTRAX) - ABS - ZORTRAX E ENSAIOS.....	118
	ANEXO 13 - CPs Z10A-100% (ZORTRAX) - ABS.....	121
	ANEXO 14 - CPs Z10A-100% (ZORTRAX) - ABS - STANDARD DEVIATION MODEL	124
	ANEXO 15 - CPs Z10A-100% (ZORTRAX) - ABS - ZORTRAX E ENSAIOS.....	127
	ANEXO 16 - CPs 5A-100% (CUBEX + ZORTRAX) - ABS.....	130
	ANEXO 17 - CPs 5A-100% (CUBEX + ZORTRAX) - ABS - STANDARD DEVIATION MODEL.....	133

ANEXO 18 - CPs 5A-100% (CUBEX + ZORTRAX) - ABS - ZORTRAX E ENSAIOS ...	136
ANEXO 19 - CPs 10A-100% (CUBEX + ZORTRAX) - ABS.....	139
ANEXO 20 - CPs 10A-100% (CUBEX + ZORTRAX) - ABS - STANDARD DEVIATION MODEL.....	142
ANEXO 21 - CPs 10A-100% (CUBEX + ZORTRAX) - ABS - ZORTRAX E ENSAIOS..	145

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são abordados os aspectos orientadores desta pesquisa, que incluem considerações iniciais, formulação do problema, relevância da pesquisa, objetivos e organização da dissertação.

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A manufatura aditiva (MA), usualmente conhecida como impressão 3D, tem influenciado desde o primeiro modelo sólido impresso de Kodama (1981). Após o rápido desenvolvimento dessa tecnologia, muitas indústrias, por exemplo a de construção civil, a qual o avanço das tecnologias digitais teve como efeito a progressiva substituição da manufatura tradicional por equipamentos controlados numericamente como computador, e dentre os quais, para efeito deste trabalho, será discutida a impressão 3D. Desde então, muitos arquitetos e engenheiros vêm buscando uma solução para impressão 3D no tocante a estruturas de grande escala (YUAN; CHEN; ZHANG, 2018).

Dentro do setor da MA, segundo Crolla et al. (2017), é possível construir elementos com limitações geométricas reduzidas, conectando materiais já utilizados na construção tradicional com novos materiais, o que pode resultar em conjuntos e formas com características mais relevantes que as tradicionais, ou seja, mais resistentes, mais econômicas e esteticamente mais atrativas. Esses novos elementos podem ter também propriedades mecânicas especiais, isto é, ser mais resistentes e mais leves, conseqüentemente podem ser transportados com maior facilidade e/ou produzidos em locais com maior dificuldade de acesso. Uma nova disposição de possibilidades de design para uso na arquitetura e na engenharia permite que as formas possam ser traduzidas e otimizadas da melhor maneira possível, produzidas em geometrias ainda desconhecidas devido à complexidade exigida.

Experimentos interativos com modelos estruturais, como um protótipo virtual, permitem prever a performance de uma estrutura por meio de simulação e melhorar, de forma iterativa, o desempenho do sistema. Uma forte inclinação para a inovação é previsível, em virtude das grandes mudanças nos domínios do design computacional e das ferramentas avançadas de fabricação digital (NABONI; PAOLETTI, 2015).

A tendência à customização de edifícios pode ser vista tanto como uma combinação de um impulso tecnológico, quanto como uma necessidade para satisfazer às demandas do

mercado. No caso específico das impressoras 3D FDM¹, que geralmente são empregadas para produção de objetos não estruturais, foi constatado uma mudança nesse paradigma, pois alguns pesquisadores conseguiram aplicar essa tecnologia para produzir elementos estruturais (DIVYATHEJ; VARUN; RAJEEV, 2016; CROLLA et al., 2017; HAEUSLER et al., 2017; NABONI; KUNIC, 2017). Portanto, dentre diferentes materiais, as aplicações mais usuais de impressão 3D são para polímeros, destacando-se o ABS² e o PLA³, os quais podem ser empregados na produção de componentes estruturais (BRISCHETTO et al., 2018).

De acordo com Divyathej, Varun e Rajeev (2016), objetos impressos em ABS e PLA possuem caráter anisotrópico⁴ e podem apresentar resistência à tração, à flexão e à compressão. Diante desses fatores e com base nesses estudos, esta pesquisa tem como intenção, explicitar algumas das práticas existentes (tipos de impressão, detalhamento e modelos). Com isso, faz-se então a conexão necessária entre arquitetura, engenharia e construção (AEC), com ênfase na análise mecânica estrutural, e propõe-se a simulação de desempenho estrutural de componentes produzidos a partir de impressoras 3D.

Admitindo-se que as limitações dos processos de arquitetura e engenharias podem ser vistas como um “atraso” tecnológico e organizacional no setor da construção civil, pesquisas neste setor são necessárias, para que sejam discutidas e testadas/ensaiadas alternativas para a melhoria e inovação dos seus processos produtivos e construtivos (NABONI; KUNIC, 2017).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 GERAL

O objetivo geral desta pesquisa se baseia na compreensão, na análise e na aplicação da manufatura aditiva para AEC, com foco na utilização do polímero ABS para criação de Corpos de Prova (CPs) que possam ser estudados e seus comportamentos mecânicos ensaiados.

¹ A sigla FDM (Fused Deposition Modeling), Modelagem de Deposição Fundida em português, também conhecida como fabricação de forma livre de filamentos, é um processo de impressão 3D que utiliza um filamento contínuo de um material termoplástico.

² A sigla ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) significa Acrilonitrila Butadieno Estireno, em português. Trata-se de um copolímero termoplástico sintético, rígido e leve, derivado do petróleo, com facilidade de moldagem por injeção, extrusão, sopro e conformação ao calor. Permite adição de pigmentos, é reciclável e também possui propriedades de isolante elétrico.

³ A sigla PLA (Polylactic Acid) significa Políácido Láctico ou Ácido Poliláctico, em português. Trata-se de um polímero termoplástico, constituído por moléculas de ácido láctico, biodegradável e reciclável.

⁴ Anisotrópico significa que certas propriedades físicas (dureza, resistência mecânica, refração da luz, por exemplo) dependem da direção em que são medidas.

1.2.2 ESPECÍFICOS

- ❖ Impressão e ensaios destrutivos de CPs fabricados com os polímeros ABS.
- ❖ Análise comparativa entre os resultados dos ensaios dos CPs impressos pelas impressoras Cubex Duo e Zortrax M200.
- ❖ Simulação para aferição do comportamento mecânico dos modelos impressos.
- ❖ Análise microscópica dos modelos ensaiados com o propósito de compreender o comportamento das fibras internas que formam os CPs.

1.3 JUSTIFICATIVA

A manufatura aditiva vem passando por um processo de mudança, em que novos materiais, novas geometrias e novas combinações de processos tradicionais com atuais podem gerar uma hibridização com potencial para ser aplicada diretamente nas construções atuais e futuras. Concomitantemente, é fundamental fomentar discussões sobre a aplicação de tecnologias como a MA, o que pode impactar a indústria da AEC e contribuir para o esclarecimento e aprimoramento de arquitetos e engenheiros quanto a esse processo e suas peculiaridades.

A continua busca por avanços tanto nos processos construtivos quanto nos materiais a serem utilizados, fez com que essa dissertação buscasse alternativas para melhoria em uma pequena parte desses processos. Através da aplicação de análises estruturais dentro da MA utilizando-se de ferramentas como a simulação, comparações e microscopia, fez-se possível encontrar um caminho a ser percorrido para realizar essa integração e compressão.

Portanto opções como a impressão 3D devem ser pensadas de maneira cabal, agindo sobre o máximo possível de aspectos intervenientes. Partindo desta perspectiva, novas opções estão sendo desenvolvidas, o que demanda mais estudos, mais ensaios e novas abordagens.

A pesquisa traz como seu com recorte, uma alternativa para o aperfeiçoamento de modelos impressos em 3D, discutindo suas aplicações e seus resultados por meio de uma análise sobre a resistência mecânica. É importante também discutir a gestão da criação de novos modelos e novas aplicações para a MA, assim como determinar interfaces entre os modelos e a realidade do mercado, buscando contribuir para cenários específicos e, naturalmente, para aplicações cada vez mais eficientes, gerando uma oportunidade para o fomento de discussões sobre como a MA pode contribuir para o setor da AEC.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação foi dividida em cinco capítulos:

- a) 1. INTRODUÇÃO, apresentação das considerações iniciais da pesquisa com a exposição do problema e sua relevância, os objetivos, geral e específicos estão descritos anteriormente;
- b) 2. REVISÃO DE LITERATURA, foi contextualizada em forma de tópicos para exposição da conceituação da pesquisa;
- c) 3. METODOLOGIA, esse capítulo relata de forma detalhada como foi o processo de desenvolvimento dos quatro objetivos específicos da pesquisa. A primeira etapa é composta pelo processo metodológico para elaboração dos novos ensaios; a segunda etapa delimita os critérios e passos a serem seguidos para realizar as comparações entre os resultados desta pesquisa com a de Martinez et al. (2017); a terceira etapa apresenta como foram desenvolvidos os detalhes para execução das simulações nos CPs e por último, a análise microscópica, mostrando os detalhes dos procedimentos adotados para sua realização;
- d) 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO, assim como o capítulo anterior, esse foi separado em quatro etapas. A primeira é destinada a realização das impressões e novos ensaios, apresentando os resultados obtidos durante todo o processo; a segunda etapa utiliza os valores encontrados na etapa anterior, para realização das comparações entre este trabalho e o de Martinez et al. (2017), explicitando os resultados obtidos; a terceira etapa é a realização da simulação, utilizando todos os resultados anteriores, para criação de parâmetros utilizáveis na simulação e por fim, existe a etapa da análise microscópica, em que todos os CPs foram seccionados e analisados por imagens geradas através do microscópio, para determinação das características e detalhes das fibras internas;
- e) 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS, esse capítulo consta de forma direta e criteriosa as conclusões obtidas os desafios e limitações, e por fim as recomendações para estudos futuros.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo foi realizada a coleta de informações por meio de pesquisa bibliográfica, com o intuito de entender o alcance da impressão 3D e como ela tem sido compreendida por diferentes autores. Esse conhecimento e mapeamento são cruciais para o desenvolvimento dos próximos capítulos.

2.1 CONCEITUAÇÃO DA PESQUISA

O setor da construção civil apresenta algumas particularidades e complexidades. Yavuz e Sagiroglu (2016) afirmam que as construções são realizadas dentro dos limites e das possibilidades de seu tempo, em termos de tipo, métodos de produção, qualidade, dimensões e técnicas de aplicação. Portanto, é conhecido que na construção são utilizados predominantemente materiais provenientes da natureza e que possam ser encontrados nas proximidades, objetivando a busca pelo menor esforço de produção.

O ambiente natural (terra, água, ar e vida), o ambiente construído (habitação, edifícios, transporte e infraestrutura) e o ambiente digital (poder de computação, internet, grandes dados e tecnologia) estão, cada vez mais, moldando às economias e às sociedades. A tecnologia digital está alterando os padrões de fabricação, principalmente devido aos desenvolvimentos recentes em áreas como inteligência artificial, impressão 3D, interação homem-máquina, automação e robótica, além de influenciar o aumento da capacidade de processamento e armazenamento de dados computacionais (PARITALA; MANCHIKATLA; YARLAGADDA, 2017). Um exemplo é a MA, que é um importante conceito em inovação na AEC, por meio do qual os avanços digitais e de materiais permitem que sejam criados produtos cada vez mais personalizados e complexos.

Segundo Crolla et al. (2017), os processos de fabricação tradicionais, são intensivos em mão de obra e aumentam o tempo e o custo de desenvolvimento. Nesse aspecto, as tecnologias digitais trazem à fabricação digital como uma importante ferramenta. Uma de suas ramificações, que é o principal destaque desta pesquisa, a MA, está se tornando uma alternativa promissora em substituição às técnicas tradicionais de fabricação. É importante ressaltar que os processos tradicionais estão perdendo espaço para os produtos personalizados, itens que satisfazem às necessidades de maneira otimizada e eficiente (HAEUSLER et al., 2017).

Os métodos de MA introduziram novos processos de materialização, em que as lógicas de sustentabilidade e eficiência típicas da produção em massa não são mais aplicáveis. O controle sem precedentes, a precisão e a liberdade de fabricação permitem a conceituação de sistemas arquitetônicos ainda não vistos, cuja abordagem experimental desafia os atuais paradigmas de design da arquitetura (NABONI; KUNIC, 2017). Nesse cenário, pesquisas vêm sendo desenvolvidas com diferentes intuitos, buscando a otimização de peças, acessórios e processos. Essa busca contínua por novos itens promove um grande desenvolvimento, principalmente na parte sistêmica, tanto do processo quanto das ferramentas nele utilizadas.

Divyathej, Varun e Rajeev (2016) ressaltam que a qualidade da impressão 3D depende de diferentes fatores, como a espessura das camadas, a orientação, o suporte e a temperatura de impressão, bem como de diferenças entre equipamentos. Cada um dos fatores influencia o processo de impressão 3D, portanto devem ser confrontados com a fase de preparação do modelo, de impressão e de pós-impressão. De acordo com o objetivo buscado no modelo impresso, seja ele estrutural, estético e/ou complementar, essas características citadas podem ter prioridades, assim como podem promover diferentes mudanças no produto.

Critérios baseados no material, no comportamento estrutural e em técnicas de fabricação estão associados a parâmetros como a escolha do material, que interage com a rigidez, a espessura e o dimensionamento, o que torna necessária a utilização de alguns softwares e plug-ins (Karamba, Millipede, Kangaroo e Scan & Solve) que analisem a rigidez, a inércia de dobramento e a estabilidade da flambagem, dentre outros fatores (MEYER et al., 2015).

No entanto, de acordo com Naboni e Kunic (2017), a implementação do uso da impressão 3D em construção de edifícios ainda exige mais desenvolvimento, em termos de material e de equipamentos para fabricação. Porém, o rápido desenvolvimento de polímeros térmicos para impressão 3D, com melhorias em suas propriedades físicas e mecânicas, vem oferecendo perspectivas relevantes em aplicações com FDM, o que não descarta a importância de aprimorar os processos de simulação e ensaios, para que essa melhoria possa ser alcançada e, conseqüentemente, a maior aplicabilidade da MA no produto final possa ser obtida.

Segundo Haesuler et al. (2017), apesar da maioria das impressoras 3D ainda apresentar limitações quando se trata de imprimir componentes estruturais otimizados sob medida, a manufatura ativa avançou continuamente na última década. Esse é o caso dos materiais usados atualmente e de suas técnicas associadas. Assim, a impressão 3D ainda não teve um impacto muito significativo na escala dos edifícios, havendo somente alguns

projetos experimentais. Como discutido, escala, custo e desempenho estrutural também limitam o avanço até este ponto.

De acordo com Maserà et al. (2017), o uso da MA na construção caminha a passos largos, porém é ainda recente. Afirma também que pesquisas têm impulsionado o desenvolvimento da área, o que faz com que seja possível e cada vez mais próxima sua aplicação, em maiores escalas, no setor da AEC. Gradativamente, a aplicabilidade de edifícios “híbridos”, parcialmente construídos de forma tradicional, parcialmente impressos em 3D, está se tornando realidade.

2.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta fundamentação teórica está baseada nos princípios que ligam a MA aos principais propósitos desta pesquisa: a análise mecânica desses novos materiais e como eles podem impactar o processo de evolução do setor, através do comportamento desses materiais do ponto de vista de suas propriedades físicas e mecânicas.

Nesta pesquisa foi utilizado o processo de impressão FDM, em que a adição de material é feita por meio de camadas, o que torna essa tecnologia flexível e, portanto, adaptável a diversos materiais, como polímeros, metais e agregados, para obter compostos como ABS, resina e fibra de carbono, e até mesmo materiais cimentícios (RIPPMANN et al., 2018). Este estudo se restringiu a fazer análises de materiais que pudessem ser testados em laboratórios da Universidade Federal de Viçosa⁵, como é o caso do ABS e do PLA.

Segundo Rippmann et al. (2018), cerca de 40% do consumo mundial de energia e um terço das emissões mundiais de gases de efeito estufa (GEE) são atribuídos ao setor da construção civil. Pesquisas significativas e esforços legislativos foram feitos para reduzir as emissões de GEE durante as operações das edificações (emissões operacionais), enquanto as emissões produzidas durante a construção (emissões incorporadas) receberam muito menos atenção. Recentemente, maior atenção tem sido dada para as emissões incorporadas, uma vez que elas representam uma grande porcentagem do total de emissões de GEE no ciclo de vida do edifício, e essa porcentagem tende a aumentar à medida que os edifícios se tornam mais eficientes em termos energéticos durante o seu funcionamento (IBN-MOHAMMED et al., 2013; RIPPMANN et al., 2018).

⁵ **Nó.Lab**, Laboratório de Modelagem Digital no Departamento de Arquitetura e Urbanismo.
LMC, Laboratório de Materiais de Construção no Departamento de Engenharia Civil.

A maior parte das emissões incorporadas se relaciona com a estrutura dos edifícios, em particular com as lajes de piso e o telhado. Segundo De Wolf (2018) e Rippmann et al. (2018), existem duas maneiras de reduzir as emissões de GEE incorporadas: a primeira é mediante a redução do volume de materiais utilizados e a segunda é utilizando materiais com baixo teor de carbono incorporado. A MA representa uma forte alternativa para redução do volume e para utilização de materiais de menor impacto ambiental. Os materiais recicláveis e ecologicamente corretos apresentam menor resistência que os materiais comumente usados, no entanto algumas alternativas estão surgindo para melhoria desses processos, por exemplo, o concreto de cimentos ativados por álcalis⁶, baseados em resíduos reciclados, adequado para ser usado em impressão 3D e em processos alternativos de fabricação digital, mesmo que hoje possa ser considerado estruturalmente fraco (WANGLER et al., 2016).

Entretanto, pesquisas mais recentes demonstram que a capacidade de carga suficiente pode vir por meio da geometria estrutural, em vez da resistência do material, fornecendo uma solução para esses materiais serem usados estruturalmente e com segurança (DE WOLF, 2018; RIPPMANN et al., 2018), o que vai ao encontro da segunda recomendação sobre a utilização de carbono de baixa incorporação materiais. Os próximos tópicos a serem abordados são principalmente a impressão do polímero ABS e seus ensaios, simulações e análises (que incluem o polímero PLA) e posteriormente as fundamentações dos fatores no processo construtivo desta pesquisa, que vão desde as análises de investimentos e recursos na área da MA, até o processo de impressão, assim como uma visão sistêmica que mostra um pouco da percepção dos pesquisadores que atuam nesse setor.

Fatores como materiais e tipos de impressão também serão descritos, pois eles são determinantes em relação ao projeto e ao produto a ser desenvolvido. As utilidades e as dificuldades não podem deixar de ser mencionadas, uma vez que, a partir delas, novas pesquisas e novos produtos poderão ser desenvolvidos, tendo como base as aplicações anteriores. Por fim, será abordado um panorama mais completo sobre a resistência mecânica dos materiais e como a análise das geometrias pode afetar a qualidade do produto final, o que contribuirá para que a criação e o desenvolvimento de novos produtos na área da impressão 3D que sejam otimizados e ampliados.

⁶ US EPA (United States Environmental Protection Agency) significa Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, em português. Segundo a US EPA, além do fato de os cimentos ativados por álcalis serem competitivos com o cimento Portland, ordinário em desempenho e custo, sua fabricação produz 95% menos CO₂ e eles têm vida útil mais longa.

2.3 EVOLUÇÃO DA IMPRESSÃO 3D

Com base no sistema de MA por extrusão, constata-se que as impressoras que utilizam o sistema FDM são as mais populares para a impressão de compósitos poliméricos. Segundo Dizon et al. (2018), o cofundador da Stratasys, Scott Crump, foi quem patenteou o processo FDM, em 1989.

Panda et al. (2016) relatou que a MA se tornou conhecida a partir da patente de Crump, dando início às aplicações da tecnologia, cujas principais utilidades registradas, entre 1986 e 2011, foram o design do produto, a produção de peças, o desenvolvimento da prototipagem rápida e o conceito de modelagem. O catalizador para produção em massa veio com a produção generalizada de peças, o que impulsionou a economia do setor e promoveu a “revolução” da produção por meio da MA. De 2011 a 2014, a MA deu um salto em relação à fabricação de produtos tanto personalizados quanto em massa, democratizando o processo e a produção, o que o tornou mais acessível ao público.

Segundo Yuan; Chen; Zhang, (2018), o primeiro modelo sólido impresso foi projetado e executado por Hideo Kodama, em 1981. Sua pesquisa foi realizada com o intuito de obter um novo método para fabricação automática de um modelo plástico tridimensional. Um modelo sólido foi produzido, expondo o polímero de fotoendurecimento líquido aos raios ultravioletas (UV) e empilhando as camadas solidificadas em seção transversal. Quando um polímero de fotoendurecimento líquido é exposto a raios UV (comprimento de onda entre 300 e 400 nm), ele é solidificado a partir da superfície. A espessura da camada solidificada é uma função da intensidade UV e do tempo de exposição. Portanto, uma camada solidificada de forma e espessura desejada pode ser obtida quando a área de exposição, a intensidade e o tempo são controlados (KODAMA, 1981).

A pesquisa realizada por Kodama revela a construção de três modelos de impressora 3D, todos seguindo o sentido de impressão de fotoendurecimento. Segundo Panda et al. (2016) e Dizon et al. (2018), os processos de fotopolimerização fazem uso de resinas líquidas, curáveis por radiação, ou de fotopolímeros, como seus materiais primários. A maioria dos fotopolímeros reage à radiação na faixa de comprimentos de onda UV, mas alguns sistemas de luz visível também são usados. Após a irradiação, esses materiais sofrem uma reação química, para se tornarem sólidos. Essa reação é chamada de fotopolimerização. Os fotopolímeros foram desenvolvidos no final dos anos 1960, e logo se tornaram amplamente aplicados em várias áreas comerciais, principalmente na indústria de revestimento e impressão.

Segundo Dizon et al. (2018), a SLA na verdade refere-se a uma diversidade de impressoras 3D, que atuam com laser e resina líquida. O laser age sobre a resina, incidindo calor em determinados pontos, definidos pelo arquivo de impressão. Nos pontos atingidos pelo laser, o material endurece e vai tomando a forma desejada. O processo é feito camada por camada, até que o projeto esteja conforme o planejado. Geralmente, os objetos assim gerados precisam de acabamento após a impressão e são mais frágeis. Já a DLP é uma impressora que se parece com a SLA. A máquina utiliza uma fonte de luz que é diferente do laser. Em vez de endurecer o material, camada por camada, o processo acontece em uma única etapa. A luz é a responsável pela solidificação do material. As impressoras DLP são muito ágeis, o que permite produzir objetos com muitos detalhes e alta resolução (PANDA et al., 2016; DIZON et al., 2018).

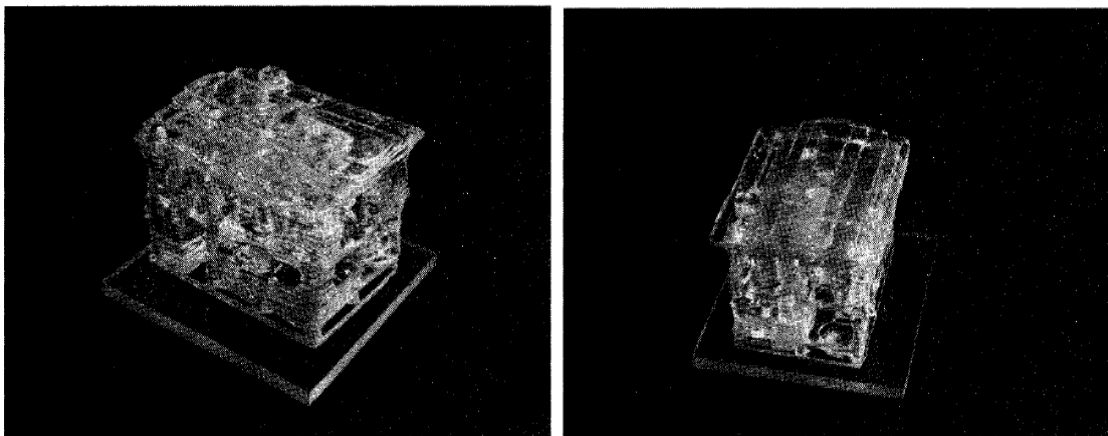
Segundo Kodama (1981), foram impressos três modelos em cada uma das impressoras (impressoras A, B, C). Esses três modelos serão mostrados a seguir.

Um modelo de casa fabricado pelo equipamento A é ilustrado na Figura 1. Ele tem 70 x 50 x 54 mm de tamanho, espessura da camada de 2,0 mm e 27 camadas. Nesse modelo, a lâmpada de mercúrio foi usada a uma distância entre a lâmpada e a superfície do líquido de 40 cm, e o tempo de exposição para cada camada foi de 10 minutos. O tempo total de fabricação foi de 4,5 horas. As estruturas internas, como divisórias, móveis e escadas, também são modeladas e podem ser observadas do lado de fora do modelo.

Figura 1: Modelo de casa fabricado pelo equipamento A

(a) Vista norte-leste da casa

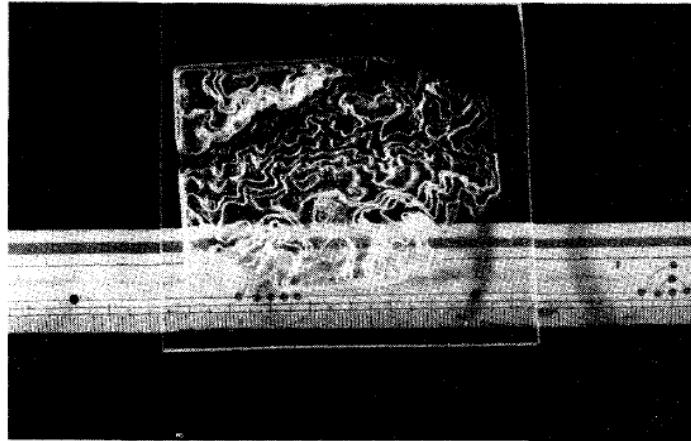
(b) Vista Sul da casa



Fonte: Kodama, 1981.

Na Figura 2 tem-se o mapa de relevo de uma região montanhosa fabricado pelo equipamento B. Nessa figura, a fotografia retrata a parte inferior do modelo, cujo tamanho é de 76 x 55 x 18 mm. O modelo foi feito com 12 camadas, tendo cada uma 1,5 mm de espessura. Nessa fotografia constata-se que a interface entre camadas adjacentes é invisível e o modelo transparente.

Figura 2: Um mapa de relevo fabricado pelo equipamento B



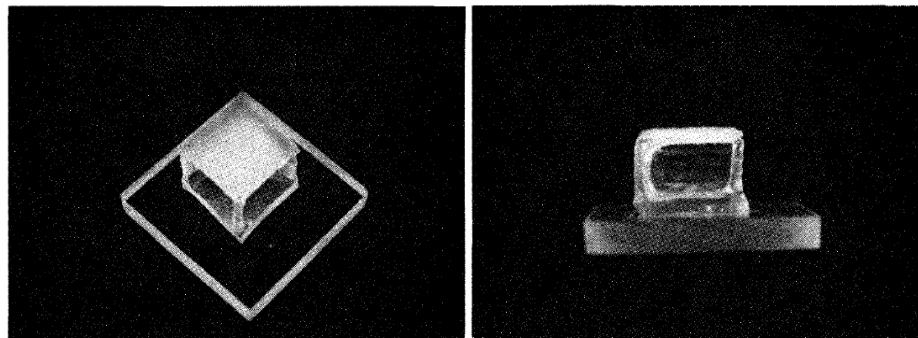
Fonte: Kodama, 1981.

Um modelo fabricado pelo equipamento C é ilustrado na Figura 3. O modelo, de 20 x 20 x 12,5 mm, é formado por cinco camadas de 2,5 mm de espessura. As condições para sua fabricação foram que a velocidade de escaneamento, o diâmetro do feixe e a largura de linha corresponderem a 2,5 mm/min, 2,4 mm e 1,8 mm, respectivamente. O tempo necessário para digitalizar uma camada foi de 96 minutos e o tempo total de fabricação foi de 8 horas, comprovando, assim, que modelos sólidos de formas bastante complexas podem ser produzidos por meio dessa técnica.

Figura 3: Um exemplo de modelo sólido fabricado pelo equipamento C

(a) Vista superior

(b) Vista lateral



Fonte: Kodama, 1981.

2.4 EXPECTATIVA DE CRESCIMENTO PARA MANUFATURA ADITIVA

A MA ainda está em processo de crescimento e amadurecimento, após mais de 25 anos de pesquisa, desenvolvimento e uso da impressão 3D em vários domínios, como industrial, aeroespacial, automotivo, médico e recentemente no setor da AEC, ela continua a crescer, com a adição da fabricação digital para construção (TAY et al., 2017). A impressão 3D é caracterizada como uma mudança da produção em massa para uma customização nas fronteiras indefinidas entre bits e átomos, entre digital e material, entre projetar e produzir (BRESEGHELLO, 2015).

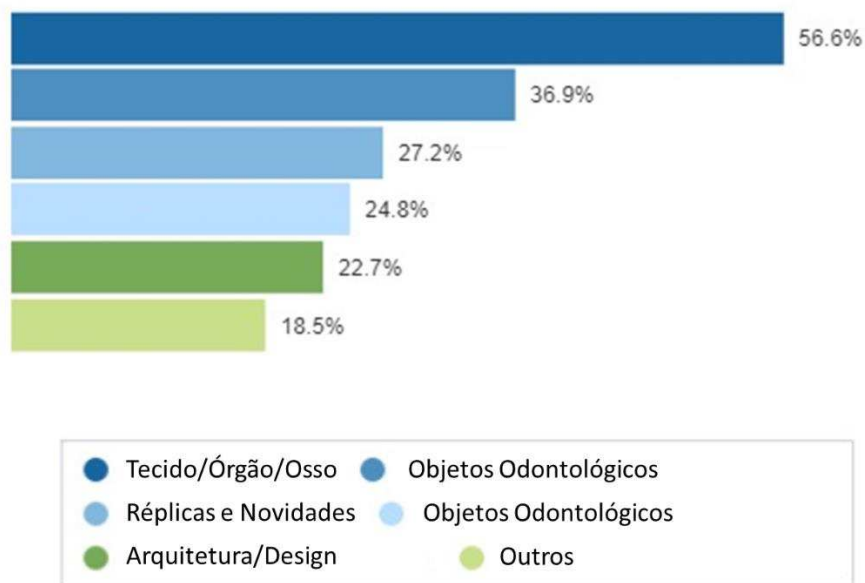
Segundo Oxman e Oxman (2010), a MA oferece aos arquitetos, engenheiros e designers a oportunidade de questionar algumas das premissas restritivas que estão profundamente enraizadas no pensamento do design modernista e reforçadas pelas lógicas tradicionais da cadeia construtiva e industrial. Graças aos avanços nesses campos, é possível aplicar estratégias para proporcionar o máximo desempenho com recursos mínimos, por meio da variação e otimização de propriedades de materiais locais. Essa abordagem pode resultar em um sistema de construção mais integrado, evitando a separação entre os diferentes componentes do edifício, que são tipicamente produzidos em massa e não adaptáveis, o que faz com que eles se tornem personalizáveis de acordo com a necessidade do projeto.

O setor da MA vem crescendo e apresentando resultados positivos em relação ao número de investimentos na área, apontando valores significativos no setor, ao longo dos anos. De acordo com pesquisas realizadas por Breseghello (2015) e Maserà et al. (2017), projeções em relação aos investimentos estão alcançando a casa dos bilhões. Em relação ao mercado mundial, essas projeções vêm se multiplicando, gerando uma proporção próxima à duplicação dos investimentos a cada cinco anos, tudo isso graças aos avanços nas pesquisas, que produzem novos materiais e novas formas de aplicá-los.

Segundo a IDC (2017) e Dizon et al. (2018), o consumo global de sistemas de impressão 3D, de materiais de impressão, de peças e de softwares e serviços relacionados totalizou mais de US\$ 13 bilhões em 2016. Além disso, espera-se que os gastos mundiais em impressão 3D tenham uma taxa de crescimento anual de 22,3% nos próximos anos, e cerca de US\$ 29 bilhões de receita são esperados até 2020. Somente em 2015, 278.000 impressoras 3D foram vendidas em todo o mundo. Nesse ano foi registrada uma taxa de crescimento de 34,9%, a mais alta em quase duas décadas.

Os três principais casos de uso de impressão 3D são protótipos, peças de reposição e peças para novos produtos, respondendo por quase 44% dos gastos do setor em 2018. A previsão é que para 2021 objetos odontológicos e objetos de suporte médico serão o quarto e o quinto maiores casos de uso, em grande parte impulsionados pela área de saúde e de serviços (IDC, 2017; DIZON et al., 2018). No Gráfico 1 tem-se a previsão dos principais casos de utilização da impressão 3D em cinco anos (2016 a 2021).

Gráfico 1: Principais usos de Fabricação Aditiva (3D)



Fonte: Traduzido de IDC 2017.

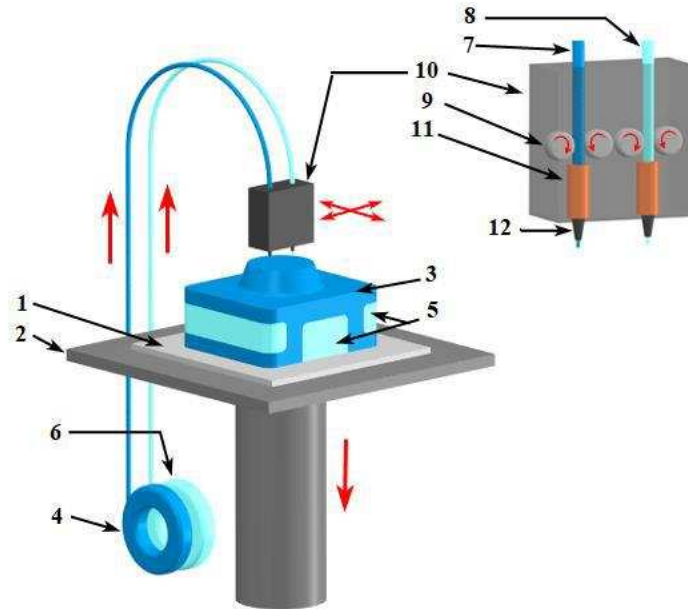
2.5 TIPO DE IMPRESSÃO E MATERIAIS

Na MA existem diversos tipos de impressão e de materiais, que variam de acordo com a sua finalidade. Na busca pelas melhores definições dos tipos de impressão e dos materiais utilizados no seu processo, este tópico tratará especificamente da impressão 3D por extrusão de material sob a forma de filamento termoplástico, excluindo-se outras técnicas e materiais.

A Modelagem de Deposição Fundida (FDM) é uma técnica de derretimento de material em que é utilizado um carretel de filamento termoplástico, que pode possuir diâmetros variados a serem fundidos e extrudados por meio de um bocal com aquecimento. Esse sistema segue o princípio de impressão de extrusão de um material e de depósito em uma plataforma, criando uma camada bidimensional em cima de outra, resultando, assim, em um objeto tridimensional tangível.

O processo FDM pode ser visualizado da seguinte maneira (Figura 4). Importante ressaltar que nem todas as impressoras seguem especificamente esse formato, no entanto a maioria sim, assim como é o caso da Zortraz e da Cubex.

Figura 4: Processo FDM



Fonte: Carausu et al. 2018.

Segundo Carausu et al. (2018), o processo de impressão ocorre na base de impressão (1), situada na plataforma de construção do equipamento (2). A peça impressa (3) utilizando carretel do material de construção do polímero A (4), é orientada nos suportes de peças (5), realizados a partir do carretel de material de suporte do polímero B (6). Os fios do material (4, 6) passam o filamento do material de suporte (7) e o material de construção (8), que por sua vez é orientado com a ajuda das rodas motrizes (9), que podem ser encontradas na cabeça da extrusão (10) e são levados ao estado de fusão (11). Antes da colocação na superfície, os fios passam através dos bocais de extrusão (12).

O processo é descrito por meio da extrusão do polímero que é impresso na plataforma de construção, que solidifica instantaneamente graças a esse mecanismo. De acordo com Gnanasekaran et al. (2017) o uso de polímeros termoplásticos e seu processo específico de fusão de materiais são suas principais limitações.

Primeiramente, o próprio filamento deve ser fabricado com alta qualidade, pois a ação de alimentação (tensão e compressão) e fusão (aquecimento) testará sua estabilidade mecânica e térmica. Para manter uma boa qualidade de impressão, o filamento deve resistir a essas tensões, antes e depois do processo de impressão. Alguns projetos digitais em 3D são relativamente complexos (com camadas suspensas), necessitando, assim, de estruturas

complementares, mais conhecidas como estruturas de suporte. Por outro lado, o FDM é conhecido por ser de baixo custo e capaz de altas velocidades de impressão, em comparação com outras técnicas de impressão 3D (GNANASEKARAN et al., 2017; BLOK et al., 2018; DIZON et al., 2018).

Essa técnica (FDM) pode ser dividida em dois grupos de modelos de impressoras. Segundo Breseghello (2015), o primeiro grupo é caracterizado por um sistema de pórtico, usando o sistema cartesiano para controlar a movimentação, em que a extrusora se move nas dimensões X e Y, enquanto a placa está se movendo na direção Z. Essa é a maneira mais fácil de ir de um ponto a outro. Porém, sua maior desvantagem é que as partes móveis são pesadas, o que torna mais difícil parar ou mudar de direção em um instante, tendo em vista que impressora 3D precisa ser capaz de mudar a direção instantaneamente e o mais rápido possível.

Devido a essas limitações, foi proposto o “sistema delta” de robôs paralelos, que consiste em três braços conectados às juntas universais na base, sendo a principal característica do projeto o uso de paralelogramos nos braços, o que mantém a orientação final, transformando em benefício as partes móveis, que agora são leves, o que facilita seu deslocamento e, conseqüentemente, resulta em uma impressão mais rápida e de maior precisão (DIZON et al., 2018).

De acordo com Breseghello (2015), o processo de extrusão termoplástica é descrito da seguinte maneira:

[...] precisa de uma bobina de material, chamada de “filamento”, que é lentamente alimentada a uma cabeça de impressão que é aquecida entre 200 e 300 °C. Essa temperatura funde o filamento, que é então extrudado através de um bocal fino e achatado levemente pela cabeça de impressão ao sair. A primeira camada de filamento fundido é depositada diretamente sobre uma superfície horizontal, plana e lisa conhecida como plataforma de construção. Aqui o filamento esfria e cola muito rapidamente, muitas vezes ajudado por uma ou duas ventoinhas conectadas à cabeça de impressão, que está se movendo no espaço 2D para traçar a primeira camada do objeto sendo impresso. Uma vez que a primeira camada do objeto tenha sido traçada, a plataforma de construção baixa muito levemente e a próxima camada de termoplástico é depositada em cima dela. Esse processo se repete até que um objeto de plástico completo tenha sido impresso. (BRESEGHELLO, 2015, tradução nossa).

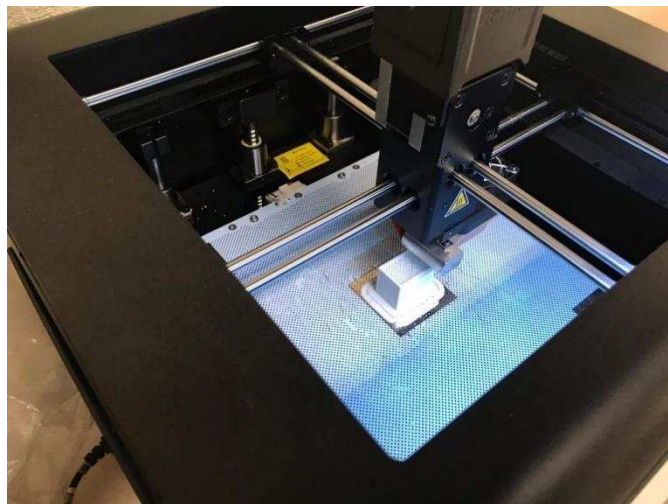
Muitos materiais podem ser utilizados como filamentos termoplásticos, sendo os mais comuns o ABS e o PLA. O ABS é um plástico não biodegradável à base de petróleo, amplamente adotado em processos de moldagem por injeção industrial, que possui utilidade ampla quando se trata de impressão termoplástica. Isso permite que os fabricantes utilizem esse material em maior escala, devido à qualidade que os ensaios de desempenho para resistência, durabilidade, segurança, dentre outros, apresentam. Por outro lado, o PLA é um

bioplástico atualmente feito a partir de produtos agrícolas, como amido de milho ou cana-de-açúcar, sendo muito mais ecológico do que o ABS. A temperatura de impressão do ABS varia de 230 a 250 °C, enquanto o PLA é mais fácil de ser impresso, com temperatura de impressão em torno de 200 - 215 °C (BRESEGHE LLO, 2015).

De acordo com BLOK et al. (2018) o ABS tende a possuir um fator de encolhimento maior do que o do PLA, principalmente devido a problemas de aderência e distorções ocasionados pela temperatura mais alta, juntamente com as características intrínsecas do material. Diferentes variantes desses dois materiais foram estudadas e testadas, para obtenção de melhores performances ou de diferentes atrativos estéticos, como o ABS-policarbonato, ou o Laywood PLA, com uma porcentagem de fibras de madeira, que dá uma aparência de madeira ao plástico. Muitos outros materiais plásticos foram desenvolvidos e comumente usados, como náilon, polyethylene terephthalate (PET) e high impact polystyrene (HIPS), e também materiais flexíveis, como o thermoplastic polyurethane (TPU).

Para efeito desta pesquisa, na impressão 3D será utilizada impressoras de menor porte e com três eixos, a Figura 5 exibe a impressora Zortrax realizando a impressão de um CP retangular em ABS, com malha interna de 45°. Nesse exemplo ela possui a movimentação no eixo X e Y, devido às suas barras de suporte do bico extrusora, e também gera movimento pela placa (aquecida) de sustentação do objeto impresso, que, por sua vez, se movimenta dentro do eixo Z.

Figura 5: Processo de impressão da Zortrax



Fonte: Autor, 2019.

Segundo Breseghello, (2015), as propriedades e os planos podem ser descritos da seguinte maneira:

Geralmente, as propriedades são isotrópicas no plano $x - y$, mas se o padrão de preenchimento de varredura for definido para depositar preferencialmente ao longo de uma determinada direção, as propriedades no plano $x - y$ também serão anisotrópicas. Em quase todos os casos, a força na direção z é mensuravelmente menor que a força no plano $x - y$. Assim, para peças que sofrem tensão em uma determinada direção, é melhor construir a peça de forma que os principais eixos de tensão fiquem alinhados com o plano $x - y$ em vez de na direção z . (BRESEGHELLO, 2015, tradução nossa).

A A extrusão termoplástica possui algumas limitações, o que pode ser um problema ou não, dependendo do campo de aplicação. O primeiro, e talvez o mais evidente, é o suporte de partes suspensas: quando o plástico extrudado não tem superfície para aderir. Geralmente 45° é considerado o limite para a construção de um objeto estável. Acima desse limite, alguns suportes adicionais devem ser concebidos, impressos e depois removidos (DIZON et al., 2018).

Algumas máquinas têm duas cabeças de extrusão, o que possibilita usar uma para extrudar um material dissolúvel para suportes, que é mais fácil de ser removido e dá melhor qualidade ao objeto final. Segundo Breseghello (2015), outro limite de extrusão termoplástica é o chamado “degrau”:

[...] efeito visível e sensível do processo de estratificação, que criará uma superfície escalonada, ao contrário de um objeto moldado por injeção que possui uma superfície lisa. O escalonamento pode ser considerado um problema menor na escala de construção, sendo um problema na ordem de milímetros, dependendo da resolução da impressora. (BRESEGHELLO, 2015, tradução nossa).

De acordo com DIZON et al. (2018), imprimir objetos grandes, a velocidade do processo pode ser um problema, pois a impressão de um cubo cheio de $20 \times 20 \times 20$ cm pode levar mais de 24 horas, dependendo da espessura da camada. Uma possível solução é usar um bico de impressão maior e maior espessura de camada, com menor precisão.

Segundo Ariffin et al. (2018), a escolha do material depende do equilíbrio entre rigidez, tenacidade, processabilidade e preço. Para uma aplicação específica, um compromisso entre esses recursos geralmente é necessário. Normalmente, a rigidez aumenta à medida que a resistência ao impacto diminui. Para os plásticos, a grande massa de experiência empírica e tradição de design efetivo que foi construída ao longo de séculos no campo dos metais ainda não está disponível. Além disso, nenhum valor único pode ser colocado na rigidez ou na tenacidade de um plástico, pois sua rigidez varia com o tempo, o estresse e a temperatura. Outro ponto importante é a resistência, que é influenciada pelo

design e tamanho do componente, pelas condições de processamento e pela temperatura de uso. A rigidez e a tenacidade também podem ser afetadas por efeitos ambientais, como envelhecimento térmico e oxidativo, envelhecimento UV e ataque químico.

A pesquisa está constantemente concebendo novas variações de materiais para impressão 3D, na tentativa de otimizar seus desempenhos, reduzindo custos e diminuindo a distância entre a fabricação aditiva e os produtos de uso final. Essa necessidade é ao mesmo tempo um grande potencial para a MA, uma vez que a engenharia de materiais está se desenvolvendo, tornando-os mais resistentes e personalizáveis.

2.6 LIMITAÇÕES

Apesar das inúmeras vantagens, os processos de MA têm ainda algumas limitações, o que pode dificultar sua aplicação em contexto industrial. Segundo Carvalho (2018), as complicações relativas ao tamanho, à resistência, à durabilidade, à qualidade e ao tempo de fabricação são ainda um grande entrave à integração dessas tecnologias na produção de bens de consumo generalizado. Ainda que sejam capazes de produzir objetos com margens de erro de décimos de milímetro, é praticamente impossível produzir dois objetos exatamente com a mesma forma e as mesmas características físicas. A tecnologia ainda não está desenvolvida o suficiente para que o resultado respeite os padrões requeridos em nível industrial.

Deve ser ressaltado que já é possível contornar esses problemas e desenvolver produtos de igual ou superior qualidade aos desenvolvidos pelos métodos tradicionais, no entanto o aumento substancial de seu custo tende a inviabilizar a produção. Portanto, o próximo passo para o aprimoramento dessa tecnologia é explorar cada vez mais a estruturação dos objetos desenvolvidos, assim como sua viabilização financeira para produção em maior escala (CARVALHO, 2018).

No entanto, segundo Johnson e Collins (2017), na indústria da AEC a etapa de prototipagem física é ignorada. Isso se deve, em grande parte, à impraticabilidade e à natureza complexa de criar um modelo em escala real. Assim sendo, deve-se criar um modelo escalado que seja funcionalmente correto e dimensionalmente preciso. Como resultado, as pessoas envolvidas no projeto compreenderão melhor o escopo dos trabalhos, o sequenciamento das principais atividades e possíveis problemas de construção. Apesar das limitações desta pesquisa, e de haver outras tecnologias de impressão 3D mais recentes, esse trabalho visa conhecer o comportamento estrutural de polímeros sob a forma de filamentos aquecidos, ainda não amplamente estudados.

A European Space Agency (ESA) explorou as possibilidades de construir estruturas na Lua, utilizando uma impressora 3D e material local, o solo lunar. A ideia básica por trás disso é a adoção de uma impressora 3D de larga escala que possa usar um material cujas composições, química e granular, sejam muito próximas das que caracterizam o solo lunar (PANDA et al., 2016). Além de criar prédios e estruturas, a impressora de concreto 3D pode ser útil para arquitetos e designers industriais. Designs muito complexos podem ser impressos usando uma variedade de materiais, a fim de melhorar as características estéticas do processo de construção atual. Outras agências, como a National Aeronautics and Space Administration (NASA), além de explorar essa tecnologia, também promovem competições, no intuito de fomentar a evolução da MA, principalmente em se tratando de modelos estruturais e de novos conceitos em diferentes materiais.

Visto que há grande complexidade em relação aos investimentos no setor da MA, o apoio dessas agências promove o desenvolvimento do setor e auxilia os pesquisadores. De acordo com o site oficial da NASA, o “*3D-Printed Habitat Challenge*” é um concurso do programa Centennial Challenges para construir um habitat impresso em 3D para exploração do espaço profundo, incluindo a jornada da Agência até a Lua, Marte ou além. O desafio multifase é projetado para avançar a tecnologia de construção necessária para criar soluções habitacionais sustentáveis para a Terra e além. A competição oferece um prêmio total de US\$ 3,15 milhões.

Além da impressão 3D, considera-se que nos próximos anos a impressão 4D passe dos laboratórios de pesquisa e desenvolvimento para papéis de produção real, dentro de organizações agressivas no uso de tecnologias emergentes (GLADMAN et al., 2016). Uma definição de impressão 4D é a impressão de objetos que são capazes de automontagem quando expostos ao ar, à água ou ao calor, devido a uma reação química. Hoje, a impressão 3D é uma das tecnologias mais atraentes e emergentes. Com o aumento do número de aplicações, ela é considerada uma inovação disruptiva deste século, e essa interrupção tende a continuar por uma longa geração (PANDA et al., 2016).

Pesquisas realizadas por Wu, Wang e Wang (2016) mostram que, por meio do processo de impressão otimizado, a impressão 3D pode trazer uma melhoria significativa na produtividade, principalmente em termos de redução de desperdício, pois o processo usa somente um pouco mais de material do que o objeto requer, o que diminui conseqüentemente, os impactos ambientais do processo de produção e construção. A flexibilidade de design do processo de impressão 3D permite aos desenvolvedores projetar estruturas difíceis de serem produzidas usando a prática de construção manual atual. Além disso, como a maior parte do processo é altamente automatizada, a mão de obra necessária pode ser reduzida significativamente.

Para aplicações práticas, as peças impressas em 3D devem suportar várias cargas mecânicas e ambientais durante o seu uso. É importante conhecer as forças exigidas para cada aplicação, sob várias condições de carga. As propriedades físicas das peças impressas em 3D devem ser semelhantes às aquelas fabricadas por métodos tradicionais. Para utilização de peças impressas 3D em aplicações efetivas, sua força, em todos os aspectos, deve ser semelhante à da peça que substituirá a convencional. Entretanto, a anisotropia mecânica representa o maior problema em peças fabricadas aditivamente, devido ao tamanho da camada (espessura, largura ou diâmetro), à trajetória da impressora, à orientação do filamento e à direção (GNANASEKARAN et al., 2017; BLOK et al., 2018; DIZON et al., 2018). Esses fatores vêm atraindo tanto o interesse dos fabricantes de impressoras 3D, quanto das pessoas envolvidas no desenvolvimento de materiais de impressão. Com cerca de 50%, entre todas as técnicas de fabricação de aditivos, a anisotropia mecânica para FDM é a maior.

A literatura confirma o fato de que as propriedades mecânicas dependem dos parâmetros de impressão. Segundo Gnanasekaran et al. (2017), Blok et al. (2018) e Dizon et al. (2018), as melhores propriedades de tração são obtidas quando os filamentos são orientados longitudinal e paralelamente à direção da incidência da carga, e as piores são obtidas quando as amostras são carregadas ao longo da peça. As propriedades mecânicas das peças impressas em 3D também variam com os seguintes fatores:

- material usado (marca, densidade, peso molecular, qualidade);
- tecnologia referente a MA usada;
- preenchimento, orientação de impressão (compilação e varredura);
- espessura da camada (resolução);
- área de seção transversal;
- pós-processamento (método e tempo);
- entre outros.

Gnanasekaran et al. (2017), Blok et al. (2018) e Dizon et al. (2018) constataram que o material de PLA tem propriedades mecânicas vantajosas e que seu material residual, que já foi impresso em 3D, pode ser reciclado posteriormente.

[...] ser um bom design de peças impressas em 3D é ter excelente qualidade com anisotropia mínima. Sempre que possível, os projetistas de peças impressas em 3D devem alinhar a carga/tensões em uma peça com a orientação mais forte do material. Estes podem ser obtidos se as matérias-primas com propriedades mecânicas ativáveis estiverem disponíveis. (DIZON et al., 2018, tradução nossa).

Segundo Wang et al. (2017), a maioria dos processos de impressão é demorada, consequentemente é difícil fabricar peças com grande volume. No entanto, novas técnicas de impressão com base no processamento escalável e rápido de materiais estão sendo desenvolvidas. Outra área de crescimento concentra-se na necessidade de sistemas de feedback, pois se ocorrer um erro durante a impressão, o processo precisa ser suspenso, o que causa perda de tempo e de materiais. Os sistemas de feedback devem ser construídos na impressora para dar uma resposta à alteração do processo. O progresso adicional das impressoras 3D é aumentar a resolução de impressão, sem prolongar o seu tempo ou sacrificar a complexidade geométrica dos produtos.

2.7 IMPRESSÃO EM ABS E PLA

O ABS e o PLA são os filamentos poliméricos escolhidos para serem utilizados na pesquisa. Esses materiais foram selecionados devido às suas características, e por serem amplamente utilizados nas impressoras 3D de menor porte, presentes em laboratórios de prototipagem e fabricação digital. A impressão desses materiais não é de grande complexidade, por isso eles são também considerados econômicos. O ABS, por exemplo, é um material fácil de ser usinado e fabricado, possui boa resistência mecânica e a impacto, bom acabamento final, além de resistência e rigidez. Já o PLA é um termoplástico compostável e biodegradável, obtido de fontes renováveis, no entanto é termicamente instável, tem rápida perda de peso molecular no decorrer do tratamento térmico e tende a ser um pouco mais quebradiço do que outros plásticos (WOJTYLA; KLAMA; BARAN, 2017).

A partir deste contexto, foi realizada uma pesquisa bibliográfica a respeito desses materiais (ABS e PLA). Alguns estudos foram analisados mais profundamente, entre eles o de Martinez et al. (2017). Em virtude da ligação entre material e resistência mecânica, este capítulo introduz conceitos referentes aos materiais escolhidos e como eles irão interagir com as próximas etapas da pesquisa.

Esta pesquisa parte do trabalho realizado por Martinez et al. (2017), no qual foram realizados ensaios de resistência mecânica para ABS e PLA, em corpos de prova impressos na impressora Cubex Duo. Essa dissertação, ampliará os ensaios, em outra impressora, utilizando a Zortrax M200, disponível no Departamento de Arquitetura e Urbanismo da UFV.

Além dos novos ensaios de resistência, a pesquisa visa comparar a variação que pode ocorrer entre diferentes impressoras, neste caso especificamente entre a Cubex e a Zortrax.

Como o desempenho da estrutura depende muito do tipo do material, as propriedades fornecem uma boa compreensão de como ele vai se comportar sob diferentes condições. Para o melhor detalhamento das propriedades dos materiais utilizados (ABS e PLA) e de outros mais comuns, foi desenvolvido o Quadro 1, que traz informações e dados gerados pela fabricante de impressoras e filamentos Zortrax. Os dados estão compilados e apresentados a seguir.

Após a escolha dos nove principais e mais comuns tipos de filamentos, foram reunidos os seus atributos e as informações mais importantes. Partindo das características dos filamentos, pode-se ter uma visão mais ampla: cada filamento tem sua qualidade destinada a um ou mais objetivos, variando de resistência à tração, à compressão e até mesmo exposição aos raios UV.

Quando o assunto é resistência mecânica, o Quadro 1 fornece informações sobre resistência à tração, que é a indicação do ponto máximo de uma curva de tensão-deformação, que seria a máxima tensão que um material pode suportar ao ser esticado antes de se romper. Fornece também estresse por ruptura (também conhecida como tensão de ruptura), que é a força máxima que pode ser aplicada em uma área de seção transversal de um material de forma que o material não possa suportar qualquer quantidade adicional de tensão antes da ruptura. Nesse quadro é apresentado também o estresse por flexão, caracterizado pelo comportamento de um elemento estrutural submetido a uma carga externa aplicada perpendicularmente a um eixo longitudinal. Além do módulo de flexão, densidade entre outros, essas características são apresentadas à luz das normas ISO (descritas em “Ensaio - ISO”).

Todas essas características serviram para ampliar o conhecimento acerca dos materiais utilizados e disponíveis para a Zortrax, nem todos foram utilizados, no entanto o quadro é um compilado de informações disponibilizadas no site da fabricante, trazendo como intuito a prática visualização dos detalhes de cada filamento.

Quadro 1: Dados dos filamentos disponíveis pela Zortrax

Nome	Ensaio - ISO	Z-ABS	Z-ASA Pro	Z-ESD	Z-GLASS	Z-HIPS	Z-PCABS	Z-PETG	Z-PLA Pro	Z-ULTRAT
Nome Genérico		<i>acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer</i>	<i>acrylonitrile-styrene-acrylate copolymer</i>	<i>polyethylene terephthalate glycol-modified</i>	<i>polyethylene terephthalate glycol-modified</i>	<i>high impact polystyrene</i>	<i>polycarbonate + acrylonitrile-butadiene-styrene blend</i>	<i>polyethylene terephthalate glycol-modified</i>	<i>polylactic acid</i>	<i>acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer</i>
Características		Filamento de múltiplos propósitos e baixo custo. Fácil processamento, ideal para iniciantes e profissionais.	Filamento resiliente para protótipos funcionais que podem suportar luz UV, chuva e vento.	Filamento perfeito para a indústria eletrônica. Garante proteção contra descarga eletrostática junto com resistência a ácidos, álcalis e sais.	Filamento com adição de fibra de vidro. Possui propriedades de transmissão de luz para modelos translúcidos e é resistente a arranhões, Luz UV e produtos químicos.	Filamento de poliestireno de alto impacto, com textura semifosca que mascara as camadas. Oferece alta resistência ao impacto e pós-processamento sem esforço.	Pode suportar facilmente impactos, luz UV, alta temperatura e tempo. Também é resistente a sais, ácidos e outros produtos químicos.	Pode suportar luz UV e passagem do tempo. O material também é excepcionalmente resistente a óleos e outras graxas.	Filamento biodegradável à base de PLA. Uma adição de giz fornece à superfície um acabamento mate exclusivo e detalhes mais visíveis com aparência de gesso.	Filamento durável e duradouro à base de ABS. Sua superfície pode ser facilmente pós-processada com acetona e tratamento mecânico.
Cores		Variado	Variado	Preto	Variado	Variado	Marfim	Preto e Cinza	Variado	Variado
Ponto de Fusão		104°C	140 - 170°C	Não Aplicado	Não Aplicado	Não Aplicado	Não Aplicado	Dados não disponíveis	Dados não disponíveis	Dados não disponíveis
Resistência à tração	ISO 527:1998	30,46 MPa	24,21 MPa	32,88 MPa	39,57 MPa	16,90 MPa	36,89 MPa	40,18 Mpa	28,78 MPa	32,60 MPa
Estresse por Ruptura	ISO 527:1999	25,89 MPa	21,94 MPa	30,73 MPa	34,61 MPa	13,02 MPa	34,76 MPa	37,27 MPa	27,10 MPa	30,70 MPa
Estresse por Flexão	ISO 178:2011	46,30 MPa	45,60 MPa	47,70 MPa	55,40 MPa	29,30 MPa	58,40 MPa	55,30 MPa	58,60 MPa	54,00 MPa
Módulo de Flexão	ISO 178:2012	1,08 GPa	1,36 GPa	1,50 GPa	1,17 GPa	1,18 GPa	1,27 Gpa	1,39 GPa	1,83 GPa	1,85 Gpa
Impacto Izod	ISO 180:2004	8,93 kJ/m2	3,81 kJ/m2	4,92 kJ/m2	2,88 kJ/m2	4,82 kJ/m2	11,40 kJ/m2	3,27 kJ/m2	2,58 kJ/m2	5,26 kJ/m2
Alongamento com tensão máxima de tração	ISO 527:2000	4,52/	2,64/	4,16/	5,94/	1,87/	6,93/	5,83/	2,55/	3,78/
Alongamento na ruptura	ISO 527:2001	11,08/	2,76/	4,46/	6,74/	7,75/	8,56/	6,39/	4,05/	4,87/
Índice de fluidez	ISO 1133:2006	11,75 g/10 min Carga 10 kg Temperatura 220° C	74,91 g/10 min Carga 10 kg Temperatura 220° C	8,57 g/10 min Carga 5 kg Temperatura 230° C	199,5 g/10 min Carga 2,16 kg Temperatura 280° C	7,14 g/10 min Carga 5 kg Temperatura 200° C	30,07 g/10 min Carga 5 kg Temperatura 260° C	20,02 g/10 min Carga 2,16 kg Temperatura 230° C	92,75 g/10 min Carga 2,16 kg Temperatura 190° C	43,88 g/10 min Carga 5 kg Temperatura 260° C
Densidade específica	ISO 1183-3:2003	1,195 g/cm3	1,176 g/cm3	1,285 g/cm3	1,409 g/cm3	1,136 g/cm3	1,139 g/cm3	1,295 g/cm3	1,426 g/cm3	1,179 g/cm3
Durômetro Shore	ISO 868:1998	69,2	68	69,2	72,2	73,2	73	71,4	77,6	73,4

Fonte: Adaptado de Zortrax, 2019.

2.8 ALTERNATIVAS PARA MELHORIA DA RESISTÊNCIA MECÂNICA

Segundo Wang et al. (2017) a incorporação de reforços de partículas, fibras ou nanomateriais em polímeros permite a fabricação de compósitos com matriz polimérica, que se caracterizam pelo desempenho mecânico e pela excelente funcionalidade. A impressão 3D é capaz de fabricar estruturas compostas complexas, com a taxa de desperdício reduzido. O tamanho e a geometria dos módulos podem ser controlados com precisão, atingindo uma satisfatória combinação de flexibilidade de processo e produto. Embora o processo de fabricação e o desempenho nesses métodos sejam bem controlados e compreendidos, a capacidade de controlar a complexa estrutura interna ainda é limitada. Devido às propriedades mecânicas e às funcionalidades intrinsecamente limitadas das peças impressas de polímero puro, existe uma necessidade crítica de desenvolver compósitos poliméricos imprimíveis com alto desempenho.

A FDM é uma técnica que permite que formas complexas sejam feitas com um grau de liberdade de projeto inatingível com os métodos tradicionais de fabricação. No entanto, as propriedades mecânicas dos materiais termoplásticos utilizados são baixas, em comparação com as dos materiais mais comuns do setor. Um exemplo desse “movimento” são as matérias-primas de impressão 3D compostas, em que as fibras de carbono são incorporadas em uma matriz termoplástica para aumentar a resistência e a rigidez (WANG et al., 2017).

Blok et al. (2018) compilaram informações obtidas em várias pesquisas relacionadas ao uso de filamentos reforçados. A maioria dos estudos relata o uso de fibras de carbono misturadas com um polímero termoplástico, o que aumenta a resistência e a rigidez do material impresso em cerca de 65%. Aponta uma visão geral sobre a impressão de filamentos reforçados, mostrando as diferentes metodologias e propriedades mecânicas relevantes.

Um importante ponto a respeito da análise realizada é a porosidade de peças compostas de fibra. Segundo Blok et al. (2018) a porosidade total diminuiu com a adição de fibras, mas em teores de fibra acima de 10% em massa a porosidade aumentou para quase 10%, mas sem distinguir entre os vazios. Foi encontrada uma redução dos vazios com a adição de fibras, o que foi atribuído à diminuição na dilatação da matriz e ao aumento na condutividade térmica, o que ajuda as contas circundantes a amolecer e melhorar a sinterização de polímeros. Volumes menores, no entanto, foram encontrados em torno das fibras, que aumentaram com os maiores teores de fibras. Por fim, constatou-se o aumento na porosidade com a adição de fibras ao filamento ABS, o que mostra que o efeito do reforço na porosidade não é totalmente compreendido.

No Quadro 2 apresenta a perspectiva dos estudos realizados por autores a respeito dos reforços em filamentos, apresenta o tipo de material usado na impressão e no reforço, assim como sua quantidade expressa em porcentagens, as técnicas utilizadas, os resultados

e as observações. Em todos os casos foi comprovado que os reforços foram válidos, aumentando a resistência mecânica dos módulos impressos, destacando também informações a respeito, como o aumento dos espaços vazios dentro dos módulos impressos, o aumento da massa e alterações incomuns comparadas a módulos não reforçados com fibra. Em suma, pode-se ter como resultado a validação do reforço estrutural, o qual mostrou-se adequado e positivo, de acordo com sua finalidade (BLOK et al., 2018).

Quadro 2: Pesquisas sobre reforços em módulos impressos

Estudo	Ning et al. (2015)	Tekinalp et al. (2014)	Shofner et al. (2003)	Yang et al. (2017)
Material	ABS	ABS	ABS	ABS
Tipo de reforço	Pó de fibra de carbono	Fibras curtas de carbono	Nanofibras de carbono crescidas de vapor	Fibra de carbono contínua
Quantidade de reforço	3 a 15 /	10; 20; 30; 40 /	10/	10/
Técnica de fabricação	Misturado no liquidificador, seguido pelo dobro da extrusão.	Mistura com reômetro de torque, seguida de extrusão de pistão.	Dimensionamento adicionado a nanofibras, mistura banbury, moldagem por compressão, granulação, extrusão de parafusos.	Impregnação <i>in situ</i> da fibra contínua por meio da fusão da matriz antes da impressão.
Resultados	Força de 34 MPa para 42 MPa, rigidez de 2 GPa para 2,5 GPa.	Força de 35 MPa a 65 MPa. Rigidez de 2 GPa para 14 GPa.	Força de 26,9 MPa a 37,4 MPa e rigidez de 0,49 GPa a 0,79 GPa.	Resistência à flexão de 7.127 MPa e módulo de flexão de 7,72 GPa.
Outros	Um aumento de conteúdo vazio de 3/ para 9/ foi registrado para 10/ em massa dos modelos.	Para 40/ em massa, algum entupimento do bico. Boa orientação de fibra para peças impressas. Conteúdo vazio de 16 a 27/ .	Má adesão entre fibras e resina encontrada por imagens de MEV. Bom alinhamento.	Resistência ao cisalhamento interlaminar muito baixa, de 2,81 MPa.

Fonte: Adaptado de Blok et al. 2018.

Segundo Wang et al. (2017), embora o reforço ajude a melhorar o desempenho de compósitos poliméricos, em comparação com os fabricados pelos métodos tradicionais, a maioria dos compósitos impressos ainda possui baixa resistência mecânica e não é capaz de atender ao requisito funcional. Portanto, etapas adicionais de pós-tratamento envolvendo infiltração ou consolidação devem ser usadas para melhorar o desempenho dos produtos impressos. No entanto, essas etapas aumentam ainda mais o custo e o tempo de processamento.

Uma das principais razões para a baixa resistência mecânica é a presença de vazios nas peças impressas. A adição de reforço pode aumentar ainda mais a porosidade, devido à fraca ligação interfacial com a matriz. Assim, a melhoria trazida pelo reforço pode ser compensada pela porosidade induzida. A repetibilidade e a consistência das peças fabricadas não podem ser garantidas pela impressão (WANG et al., 2017).

Para Shofner et al. (2003), o reforço veio por meio das nanofibras de carbono crescidas a vapor, em que foi aplicada uma taxa de 10% como quantidade de reforço, em misturador de Banbury, resultando em um aumento de força de aproximadamente 40% e um aumento na rigidez de aproximadamente 60%. No entanto, esse tipo de reforço resultou em uma má adesão entre as fibras e a resina.

Outra pesquisa selecionada foi a de Tekinalp et al. (2014). Neste caso, o reforço foi a fibra curta de carbono junto ao ABS. Constatou-se que houve variação de 10 a 40 % na quantidade inserida de material para reforçar a estrutura e que, com a mistura com reômetro de torque, foi possível mesclar o material, resultando em um aumento de força de aproximadamente 85% e em aumento da rigidez de aproximadamente 600%. Apesar de ter ocorrido entupimento recorrente no bico extrusor, o estudo se mostrou positivo.

Ning et al. (2015) utilizaram como técnica de fabricação a mistura do reforço ao material em um misturador, seguida pelo dobro da extrusão. O reforço de pó de fibra de carbono foi bem avaliado. Utilizando uma porcentagem com variação de 3% a 15 % da quantidade de material usado como reforço, podem ser obtidos resultados que revelam um aumento na resistência de cerca de 23% e um aumento na rigidez de aproximadamente 25%, além de incluir um aumento de espaços vazios de até 10%. Esses valores revelam a eficácia da utilização do reforço de pó de fibra de carbono nas estruturas analisadas.

A última pesquisa selecionada foi a de Yang et al. (2017), que constataram que o reforço veio por meio da fibra de carbono contínua, adicionada ao ABS pela fusão da matriz, antes da impressão. Utilizando aproximadamente 10% de fibra, foi possível obter uma força de 172 MPa, o maior valor registrado entre os módulos que foram reforçados, o que evidencia a grande eficácia desse sistema. Foi obtido também um módulo de flexão de 7,72 GPa, no entanto a resistência ao cisalhamento foi considerada baixa 2,81 MPa. Pode-se concluir que o reforço aplicado ao material ABS é válido e apresenta bons resultados, sendo, portanto, uma possível solução em casos em que é necessário obter maior potencial de resistência mecânica, o que também comprova sua eficácia como material aplicado para diversas finalidades.

3. METODOLOGIA

Este capítulo destina-se a apresentar o percurso metodológico adotado para a realização do trabalho e obtenção dos resultados. Primeiro será apresentada a classificação da pesquisa segundo seus objetivos e demais parâmetros e depois os procedimentos utilizados para levantamento dos dados e obtenção dos resultados.

3.1 MATERIAL E MÉTODOS

Destinado a apresentar o material e os métodos adotados na pesquisa, esse tópico segue uma ordem de subdivisão em quatro etapas:

- IMPRESSÃO E ENSAIOS MECÂNICOS, apresentando o percurso adotado para impressão e ensaios mecânicos dos novos CPs;
- COMPARAÇÃO, o material e os métodos da etapa anterior são comparados com a pesquisa realizada por Martinez et al. (2017);
- SIMULAÇÃO, expondo a resultante dos modelos utilizados nas etapas anteriores e suas alterações, para realizar as simulações;
- ANÁLISE MICROSCÓPICA, expor o processo para a análise microscópica e o entendimento das fibras internas que formam os CPs.

3.1.1 PRIMEIRA ETAPA: IMPRESSÃO E ENSAIOS MECÂNICOS

Esta etapa é composta pela impressão de Corpos de Prova para ensaios destrutivos. Neste sentido, esse trabalho seguirá a impressão de corpos de prova nas mesmas dimensões da pesquisa realizada por Martinez et al. (2017), porém não impressas pela Cubex. O objetivo é aumentar a amostragem de corpos de prova, aferir os valores de resistência para o material ABS e comparar se o desempenho estrutural também está relacionado à variação das impressoras utilizadas. Os modelos serão fabricados com o polímero ABS, impressos na impressora 3D Zortrax M200 uma impressora de maior resolução, com área de impressão de 20 cm³, mantendo as características da configuração padrão (Quadro 3).

Com o propósito de aferir o potencial da utilização efetiva de ferramentas de desenho e fabricação digital no desenvolvimento de elementos estruturais, a etapa é composta por ensaios mecânicos, combinada com uma avaliação do comportamento dos CPs, submetidos a esforços, à luz das normas ASTM E2954 (ASTM E2954-15, 2015) e ASTM D790 (ASTM D790-17, 2017) que estabelecem parâmetros para execução de determinados ensaios mecânicos.

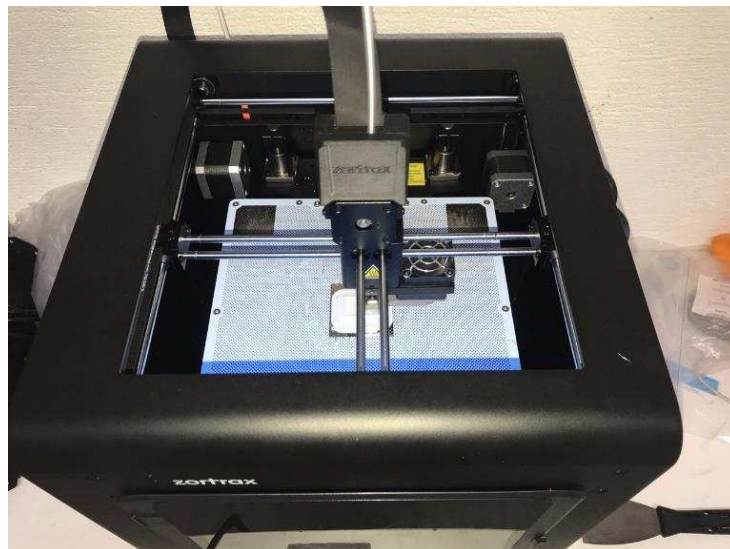
Quadro 3: Configurações padrão para impressões dos CPs de teste

Configurações Padrão ZORTRAX M200		
Temperatura da impressão	230°	Celsius
Temperatura da base de impressão	100°	Celsius
Número de camadas (superfície superior)	5	
Número de camadas (superfície inferior)	4	
Preenchimento da camada	50% - 100%	
Filamento	ABS Branco	

Fonte: Autor, 2019.

Fazendo uso do programa computacional de modelação tridimensional Rhinoceros e do editor algorítmico gráfico Grasshopper foi modelado, em ambiente digital o corpo de prova. Projetada sobre uma base adjacente, a estrutura constrói-se recorrendo ao fabrico aditivo de ABS através da impressora tridimensional Zortrax (Figura 6).

Figura 6: Impressão de um CP



Fonte: Autor, 2019.

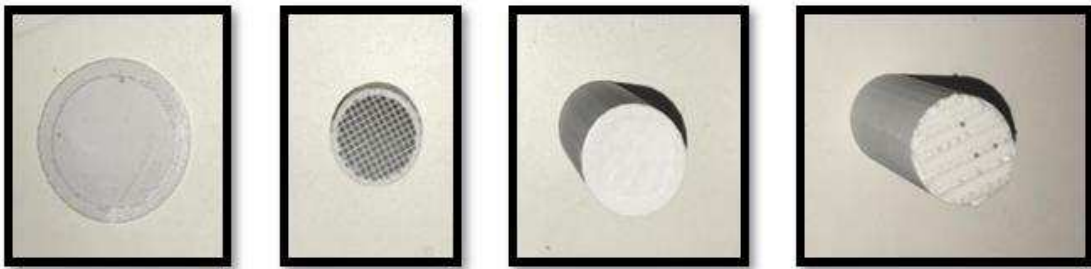
O desenvolvimento destes modelos iniciais justifica-se pela necessidade de testar e compreender, quais as melhores configurações e quais as implicações que estas teriam na execução das peças finais. Durante os testes de impressão iniciais foram realizadas várias impressões, alterando a camada, o tamanho e o preenchimento, mantendo o fluxo de material extrudado e velocidade de impressão.

Na segunda etapa os CPs foram inicialmente impressos, começando pelos modelos de tamanho 2,5 x 5,0 cm, devido ao tempo de impressão menor, comparado aos outros (5,0 x 10,0 cm). Em geral o tempo de impressão está relacionada à dimensão e massa dos corpos de prova, esse fator determinou a ordem das impressões. Durante o processo de impressão, foi desenvolvido uma codificação diferente da inicial.

A Figura 7 exibe quatro fotos relacionadas aos CPs e seu processo de finalização: a) vista superior da base de aderência formada pela impressora 3D, e posteriormente descolada dos corpos de prova; b) a geometria interna da malha dos corpos de prova com preenchimento de 50%; c) um CP totalmente impresso e acabado e por último, d) um corpo de prova com a base virada para cima e sem acabamento.

Figura 7: CPs e processo

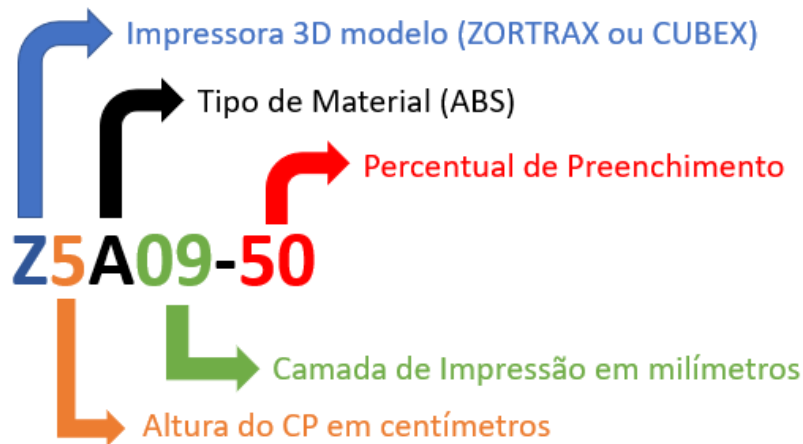
a) base de aderência b) a geometria interna da malha CP 50%
c) CP totalmente impresso e acabado d) CP base virada para cima e sem acabamento



Fonte: Autor, 2019.

Os novos CPs impressos, foram nomeados de acordo com suas características, seguido pela letra inicial da impressora, altura, material, camada e percentual de preenchimento, respectivamente. A criação dos nomes para os CPs é uma maneira mais simples para se referir a eles em textos subsequentes. A Figura 8 apresenta o processo codificado de forma mais simples e visual.

Figura 8: Codificação do CP



Fonte: Autor, 2019.

O Quadro 4 apresenta os CPs que seriam impressos na impressora Zortrax, todos em formato cilíndrico, separados de acordo com suas características básicas, como: nome, dimensão, geometria externa e interna, material, camada e percentual de preenchimento.

Quadro 4: CPs impressos na impressora 3D Zortrax

Nome	Dimensão (cm)	Geometria Externa	Geometria Interna	Material	Camada (mm)	Percentual de Preenchimento
Z5A09-50	2,5x5,0	Cilindro	Malha	ABS Branco	0,09	50
Z5A09-100	2,5x5,0	Cilindro	Maciço	ABS Branco	0,09	100
Z5A19-50	2,5x5,0	Cilindro	Malha	ABS Branco	0,19	50
Z5A19-100	2,5x5,0	Cilindro	Maciço	ABS Branco	0,19	100
Z5A39-50	2,5x5,0	Cilindro	Malha	ABS Branco	0,39	50
Z5A39-100	2,5x5,0	Cilindro	Maciço	ABS Branco	0,39	100
Z10A09-50	5,0x10,0	Cilindro	Malha	ABS Branco	0,09	50
Z10A09-100	5,0x10,0	Cilindro	Maciço	ABS Branco	0,09	100
Z10A19-50	5,0x10,0	Cilindro	Malha	ABS Branco	0,19	50
Z10A19-100	5,0x10,0	Cilindro	Maciço	ABS Branco	0,19	100
Z10A39-50	5,0x10,0	Cilindro	Malha	ABS Branco	0,39	50
Z10A39-100	5,0x10,0	Cilindro	Maciço	ABS Branco	0,39	100

Fonte: Autor, 2019.

Após análise a respeito dos novos modelos a serem impressos, foi constatado que não haveria a necessidade de se imprimir todos os modelos listados no quadro anterior. Essa análise levou a conclusão de que os modelos (Z10A09-50, Z10A19-50 e Z10A39-100) não agregariam valor expressivo nos comparativos subsequentes, tendo em vista que a análise dos modelos de geometria interna poderia ser realizada através dos outros modelos, descartando a necessidade de mais impressões. Mesmo após a retirada dos modelos

descritos, foi possível realizar os ensaios sem comprometer a etapa de comparação e consequentemente as outras etapas.

Dado o exposto, após a conclusão das impressões foi possível começar as análises e aplicações dos ensaios. De acordo com os estudos realizados por Askeland e Phule (2003) os ensaios mecânicos podem ser classificados quanto à velocidade e à integridade, são procedimentos padronizados que compreendem ensaios, cálculos, gráficos e consultas a tabelas, tudo isso em conformidade com normas técnicas. Realizar um ensaio consiste em submeter um objeto já fabricado ou um material que vai ser processado industrialmente a situações que simulam os esforços que eles vão sofrer nas condições reais de uso, chegando a limites extremos de solitação. Esta pesquisa engloba velocidade com estático e integridade com destrutivo.

Segundo Askeland e Phule (2003), em relação à velocidade, podem ser divididos em:

- a) Estáticos: carga aplicada lenta, estados de equilíbrio (tração, compressão, flexão, dureza e torção);
- b) Dinâmicos: carga aplicada rapidamente ou ciclicamente (fadiga e impacto);
- c) Carga Constante: carga aplicada durante um longo período (fluência).

Em relação à integridade, eles podem ser divididos em:

- a) Destrutivos: provocam inutilização parcial ou total da peça: (tração, dureza, fadiga, fluência, torção, flexão, impacto, tenacidade a fratura);
- b) Não Destrutivo: raios-X, ultra-som, partículas magnéticas, microdureza e tomografia.

Segundo Martinez et al. (2017), as propriedades mecânicas dos materiais podem ser caracterizadas por vários métodos de ensaio, dentre os quais foram adotados o ensaio de compressão axial, um esforço crescente de compressão distribuído de maneira uniforme ao longo da seção transversal do CP, de modo a provocar o seu encurtamento longitudinal.

O primeiro conjunto de impressões (CPs cilíndrico de tamanho 2,5 x 5,0 cm) foi concluído com 17 dias e testados após 30 dias, os CPs foram armazenados em ambiente fechado e com sílica, para evitar absorção de umidade. Os ensaios realizados foram feitos na máquina de ensaios universal (conhecida como prensa manual), a carga foi aplicada de maneira incremental com valores de deformação da amostra obtidos em intervalos de medição de 0,05 mm, devido ao pequeno tamanho dos CPs e da não adequação dos modelos na máquina de ensaio universal, gerando dados de compressão simples. A Figura 9 exibe a máquina antes do teste com o CPs.

Figura 9: Máquina de ensaio mecânico



Fonte: Autor, 2019.

Através dos resultados obtidos na prensa manual, foi possível realizar os cálculos necessários (cálculos de tensão, área de deformação...) para se encontrar os valores buscados.

A tensão de compressão para cada incremento foi calculada a partir da seguinte equação (1), onde:

P=Carga;

A= Área da seção inicial.

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

A deformação específica é dada pela seguinte equação (2), onde:

ΔL =Variação de comprimento;

L_i = Comprimento inicial.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_i}$$

O módulo de elasticidade (σ) é dado pela seguinte equação (3), onde:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

O segundo conjunto de impressões (CPs cilíndrico de tamanho 5,0 x 10,0 cm) foram impressos num prazo de 20 dias. Esses CPs foram submetidos aos ensaios da máquina universal (EMIC), visando os valores de compressão assim como do MOE⁷, já que possuíam maior tamanho, permitindo assim o ensaio de forma adequada.

Foi constatado que houve variações causadas pelo material, espessura, preenchimento e geometria da malha, dentre outros. É válido ressaltar que houve tentativas de realizar ensaios para determinação do MOE com ruptura, realizado na máquina de ensaio universal da marca EMIC modelo DL60000, porém os CPs de 2,5 x 5,0 cm se mostraram muito pequenos para a realização deste ensaio, já os modelos de 5,0 x 10,0 cm conseguiram êxito. A Figura 10 exibe a EMIC realizando o ensaio de compressão no CPs Z10A09-100.

Figura 10: Ensaio na EMIC



Fonte: Autor, 2019.

A Figura 11 exibe um CP sendo testado na EMIC, porém, além de ser comprimido, é também testado sua tensão axial, utilizando um extensômetro resistivo de fixação externa

⁷ A sigla MOE (modulus of elasticity) que significa Módulo de Elasticidade, em português. É uma quantidade que mede a resistência de um objeto ou substância a ser deformado elasticamente (ou seja, não permanentemente) quando um estresse é aplicado a ele. É definido como a inclinação de sua curva tensão-deformação na região de deformação elástica

(Clip-Gage), através de dois sensores colocados em lados opostos da amostra. O extensômetro incorpora calibração elétrica automática e reconhecimento de transdutor, os pontos cônicos são fornecidos como padrão e são recomendados para a maioria dos materiais compostos. Os extensômetros atendem aos requisitos de calibração da ASTM E83 classe B1, ISO 9513 classe 0.5 e ISO 527.

Figura 11: Extensômetros encaixados no CP para ensaio



Fonte: Autor, 2019.

Segundo o relatório técnico fornecido pelo site da Instron, o modelo utilizado no ensaio (CPs Z10A09-100) possui uma estrutura de reação adequada para a faixa de ensaios de alta capacidade, se enquadrando principalmente nos requisitos estruturais e relacionados à resistência, no entanto os modelos menores não são recomendados para ensaios em compósitos de alta resistência. O principal fator relacionado a estas características é que a prensa possui parâmetros os quais são caracterizadas para realizar ensaios em concreto e outros materiais, não em polímeros.

3.1.2 SEGUNDA ETAPA: COMPARAÇÃO

A segunda etapa é composta basicamente pela comparação da etapa anterior (“novos ensaios”) com as informações obtidas pela pesquisa realizada por Martinez et al. (2017). Os CPs foram analisados, comparados e através de um olhar crítico, a elaboração de um resultado em cima de todas as informações e dados aferidos.

Na pesquisa correlacionada (MARTINEZ et al., 2017) foram produzidos diversos CPs, impressos e testados mecanicamente, num total de 21 modelos nos filamentos PLA e ABS, compostos por um conjunto de 3 paralelepípedos (3,0 x 2,0 x 15,0 cm) e 4 cilindros nas dimensões de 2,5 cm de diâmetro e 5,0 cm de altura, e 5,0 cm de diâmetro e 10,0 cm de altura.

Para a identificação dos CPs foi mantido o padrão da codificação criado na pesquisa anterior, lembrando que existem diferenças entre os novos modelos e os criados, começando pela espessura das camadas de impressão (0.50, 0.25 e 0.10 mm), e suas dimensões (comprimento, largura e massa), aferidas com auxílio de régua e balança de precisão de 0,1 g. A codificação é descrita a seguir por Martinez et al. (2017):

Os corpos de prova foram identificados de acordo com a procedência do material (ABS e PLA), a espessura das camadas de impressão (0.50, 0.25 e 0.10 mm), e suas dimensões (comprimento, largura e massa), aferidas com auxílio de régua e balança de precisão de 0,1 g. Como identificação, os corpos de prova foram nomeados em “A”, para ABS e “P” para PLA, seguido do número de identificação da espessura de camadas, sendo 50 para 0.50mm, 25 para espessuras de 0.25mm e 10 para espessuras de 0.10mm [...]. A identificação P50, P25 e P10 designa as amostras de PLA com 0.50, 0.25 e 0.10 mm de espessura, respectivamente. Enquanto a nomenclatura A50, A25 e A10 identifica as amostras de ABS com 0.50, 0.25 e 0.10 mm de espessura, respectivamente (MARTINEZ et al., 2017).

A Tabela 1 produzida pela pesquisa de Martinez et al. (2017), foi inserida para comparação entre os CPs maciços e com malha interna, no que se refere ao tempo de impressão e consumo de material dos CPs em PLA e ABS feitos pela impressora Cubex.

Tabela 1: Modelos de CPs para Cubex, por Martinez et al. (2017).

			MASSA (g)		TEMPO (HH:MM:SS)	
			MACIÇO	MALHA	MACIÇO	MALHA
ABS	0.50	CILINDRO (2.50 X 5.00cm)	25,67	10,64	1:03:00	0:35:00
		CILINDRO (5.00 X 10.00cm)	205,81	58,36	7:31:00	2:18:00
PLA	0.25	PARALELEPÍPEDO (3.00 X 2.00 X 15.00cm)	94,59	38,41	4:00:00	1:49:00
		CILINDRO (2.50 X 5.00cm)	25,78	8,67	2:06:00	2:04:00
		CILINDRO (5.00 X 10.00cm)	206,24	46,97	15:02:00	3:45:00
	0.10	PARALELEPÍPEDO (3.00 X 2.00 X 15.00cm)	94,99	32,17	8:00:00	2:58:00
		CILINDRO (2.50 X 5.00cm)	25,83	10,2	5:17:00	4:51:00
		CILINDRO (5.00 X 10.00cm)	206,50	60,49	37:38:00	8:52:00
	0.50	PARALELEPÍPEDO (3.00 X 2.00 X 15.00cm)	95,214	39,15	20:00:00	7:08:00
		CILINDRO (2.50 X 5.00cm)	28,12	11,02	1:03:00	00:32:00
		CILINDRO (5.00 X 10.00cm)	225,41	54,72	7:31:00	1:59:00
PARALELEPÍPEDO (3.00 X 2.00 X 15.00cm)		103,60	37,50	4:00:00	1:31:00	
0.25		CILINDRO (2.50 X 5.00cm)	28,23	12,18	2:06:00	1:02:00
		CILINDRO (5.00 X 10.00cm)	225,88	67,62	15:02:00	4:27:00
	PARALELEPÍPEDO (3.00 X 2.00 X 15.00cm)	104,04	43,86	8:00:00	3:33:00	
0.10	CILINDRO (2.50 X 5.00cm)	28,29	13,05	5:17:00	1:58:00	
	CILINDRO (5.00 X 10.00cm)	226,17	71,90	37:38:00	8:42:00	
	PARALELEPÍPEDO (3.00 X 2.00 X 15.00cm)	104,28	47,22	20:00:00	7:04:00	

Fonte: Martinez et al. 2017.

Os modelos foram submetidos ao ensaio de compressão axial⁸ e o ensaio de flexão em três pontos⁹, esses foram escolhidos para determinar de forma clara e objetiva os melhores e mais resistentes modelos impressos. Importante salientar que uma das dificuldades são as limitações das impressoras de baixo custo, que ainda são entraves para

⁸ Utilizando dois extensômetros analógicos, um para a medição da carga e outro para a medição do deslocamento da placa superior. A carga foi aplicada de maneira incremental e medida pelo extensômetro analógico de constante K = 692 kgf/mm, com valores de deformação da amostra obtidos em intervalos de medição de 0,05 mm.

⁹ Os paralelepípedos foram marcados no centro do vão e a 3 cm das duas extremidades, antes de posicionados na máquina de ensaios universal. A carga foi aplicada de maneira incremental e medida com o extensômetro analógico de constante K = 692 kgf/mm.

assegurar um rígido controle de resistência e qualidade uniforme dos modelos físicos. Além disso, sob as mesmas configurações de modelagem e controles de impressão (massa, densidade, tempo, temperatura, dentre outros), há também variações decorrentes das diferenças entre equipamentos (MARTINEZ et al., 2017).

Outro problema encontrado é o tempo gasto, em alguns casos é possível observar impressões superiores a 24 horas. Em geral pode ser aferido que os CPs que possuem malha interna, em sua maioria demandam menor tempo de impressão, já os maciços demandam mais tempo, chegando a gastar aproximadamente 38 horas para impressão de um único CP.

Em relação ao tempo de impressão, os estudos indicam que há uma correção entre quantidade de material e complexidade das peças. Como conclusão foi observado que os modelos de malha gastaram menos tempo para serem impressos, em alguns casos foi ressaltado a diferença de tempo para impressão, reduzida em quatro vezes.

O Quadro 5 apresenta de forma detalhada os modelos desenvolvidos na impressora Cubex (referentes a pesquisa realizada por Martinez et al. (2017)), sendo aplicada a nova codificação, que serviu para escolha dos modelos que serão utilizados na etapa final de comparação entre os CPs da impressora Zortrax e da Cubex.

Quadro 5: CPs impressos na impressora 3D Cubex

Nome	Dimensão	Geometria Externa	Geometria Interna	Material	Camada (mm)	Percentual de Preenchimento
C5A10-50	2,5x5,0	Cilindro	Malha	ABS Branco	0,1	50
C5A10-100	2,5x5,0	Cilindro	Maciço	ABS Branco	0,1	100
C5A25-50	2,5x5,0	Cilindro	Malha	ABS Branco	0,25	50
C5A25-100	2,5x5,0	Cilindro	Maciço	ABS Branco	0,25	100
C5A50-50	2,5x5,0	Cilindro	Malha	ABS Branco	0,5	50
C5A50-100	2,5x5,0	Cilindro	Maciço	ABS Branco	0,5	100
C10A10-50	5,0x10,0	Cilindro	Malha	ABS Branco	0,1	50
C10A10-100	5,0x10,0	Cilindro	Maciço	ABS Branco	0,1	100
C10A25-50	5,0x10,0	Cilindro	Malha	ABS Branco	0,25	50
C10A25-100	5,0x10,0	Cilindro	Maciço	ABS Branco	0,25	100
C10A50-50	5,0x10,0	Cilindro	Malha	ABS Branco	0,5	50
C10A50-100	5,0x10,0	Cilindro	Maciço	ABS Branco	0,5	100

Fonte: Adaptada de Martinez et al. 2019.

3.1.3 TERCEIRA ETAPA: SIMULAÇÃO

Após os resultados dos ensaios realizados na primeira etapa e as comparações feitas na segunda etapa, foi possível dar início a terceira etapa, a da simulação, que traz um novo panorama para as análises mecânicas dos CPs.

Para dar início as simulações, foi necessário realizar alguns cálculos para obter as medidas de dispersão dos CPs. Além do exposto anteriormente, foi desenvolvido parâmetros para que fosse possível a modelagem de componentes impressos, através do uso de software de simulação Scan & Solve™, objetivando por meio destas três fases melhorias nas análises, nos ensaios mecânicos, e também a otimização dos CPs. Os resultados irão promover uma série de informações a respeito das combinações (geometria x material), com a finalidade de que essas informações colaborarem para o desenvolvimento e aplicações da MA.

A seguir será exposto a metodologia aplicada nas três fases descritas anteriormente: as medidas de dispersão, os parâmetros para as simulações e as simulações como um todo.

Segundo Casella e Berger (2010), as medidas de dispersão quantificam as variações dos dados em relação à média e qual o seu grau de representatividade. As medidas de posição (média, mediana, moda) descrevem características dos valores numéricos de um conjunto de observações em torno de um “ponto de equilíbrio” dos dados. Nenhuma delas informa sobre o grau de variação ou dispersão dos valores observados em relação à média. Em um grupo de dados os valores numéricos não são necessariamente semelhantes e apresentam desvios em relação a tendência central, usualmente, a média aritmética.

Devido aos valores encontrados na pesquisa de Martinez et al. (2017) e nas avaliações dos novos CPs desta pesquisa, foi necessário utilizar cálculos de medidas de dispersão para quantificar de forma mais precisa os valores encontrados, para assim realizar a análise sistêmica através das simulações no software. Segundo Casella e Berger, (2010) as informações a respeito das medidas de dispersão de acordo com os padrões desta pesquisa podem ser distribuídas da seguinte maneira.

O primeiro passo foi calcular a média simples e em sequência o Desvio Médio Simples (Dm), que mede o afastamento dos dados em relação à média. Representa a média das distâncias entre cada elemento da amostra e seu valor médio.

Cálculo do desvio médio (Dm):

$$Dm = \frac{|x_1 - \bar{x}| + \dots + |x_n - \bar{x}|}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n}$$

O segundo passo foi calcular a Variância, que pode ser dita como a medida de dispersão estatística que indica "o quão longe" os valores se encontram do valor esperado (média). Foi utilizada a Variância Populacional (VP), usada principalmente quando for possível observar todos os dados que compõem o universo que se deseja analisar.

Variância Populacional (VP):

$$VP = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{N}$$

O terceiro passo foi calculado o Desvio Padrão (d.p), ou desvio padrão populacional, que é uma medida de dispersão em torno da média (populacional) de uma variável aleatória. Um baixo desvio padrão indica que os pontos dos dados tendem a estar próximos da média ou do valor esperado e um alto desvio padrão indica que os pontos dos dados estão espalhados por uma ampla gama de valores.

Cálculo do Desvio Padrão (d.p):

$$d.p = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{N}}$$

O quarto e último a ser calculado foi Desvio Padrão Relativo ou Coeficiente de Variação (CV), ele mede a dispersão em termos relativos a seu valor médio. Usado em campos como engenharia e física quando se fazem estudos de garantia de qualidade e avaliações de repetitividade e reprodutibilidade. Quanto menor for o valor do coeficiente de variação, mais homogêneos serão os dados, ou seja, menor será a dispersão em torno da média. De uma forma geral, se o CV for menor ou igual a 15% terá uma baixa dispersão com dados homogêneos, se for entre 15 e 30% terá uma média dispersão e se for maior que 30% terá uma alta dispersão com dados heterogêneos.

Cálculo do Coeficiente de Variação (CV):

$$CV: \frac{d.p}{média} \times 100$$

A partir dos dados encontrados nos cálculos do desvio padrão, foi possível desenvolver os parâmetros para simulação. A criação dos parâmetros foi devida a complexidade dos dados que poderiam ser lançados no Scan & Solve e também para que os valores fossem mais próximos dos reais, utilizando assim os resultados obtidos nas etapas anteriores. A pesquisa então caminhou para aplicação dos resultados no software; ele foi escolhido devido a algumas características que se encaixavam com o ideal buscado para as simulações desta pesquisa.

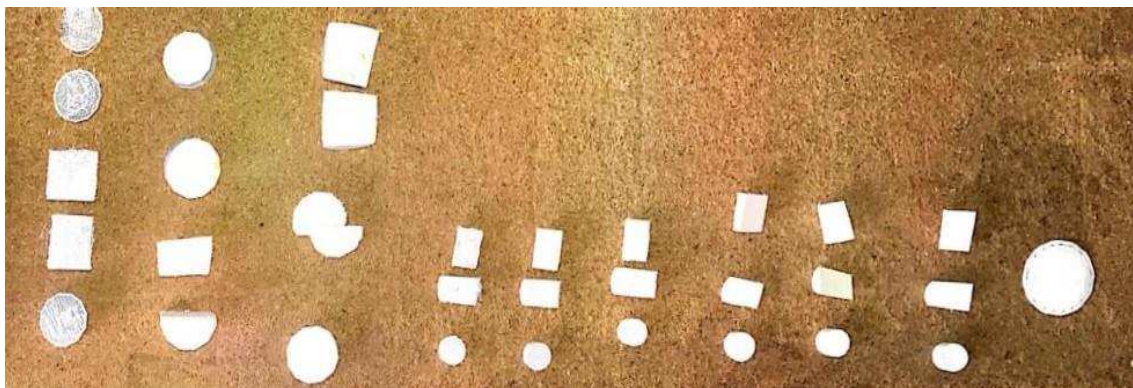
O Scan & Solve, é normalmente utilizado para análises de engenharia e é baseado em uma tecnologia meshfree¹⁰, patenteada que libera a análise de elementos finitos. A principal característica da tecnologia é o manuseio e controles separados de modelos computacionais geométricos e físicos que podem ser combinados no tempo de execução da solução. As vantagens dessa abordagem incluem flexibilidade no tratamento de erros geométricos, condições de contorno complexas e interfaces, enquanto mantém a maioria dos benefícios da análise clássica de elementos finitos (FREYTAG; SHAPIRO; TSUKANOV, 2011).

Foram desenvolvidos então, três parâmetros a serem inseridos no software, esses parâmetros serão apresentados e descritos no capítulo seguinte (Resultados e Discussão), junto à explicação de suas propriedades, eles também podem ser encontrados nos anexos, separados de acordo com cada simulação realizada. Através do desenvolvimento dos parâmetros, foi possível então realizar as simulações.

3.1.4 QUARTA ETAPA: ANÁLISE MICROSCÓPICA

Após a sistematização dos CPs, definiu-se como seriam realizados os cortes para a análise microscópica; partindo dos modelos maiores (10 cm de altura) e depois os modelos menores (5 cm de altura). Devido ao tamanho dos CPs, foi possível realizar certos padrões de corte, por exemplo, os modelos menores tiveram apenas um corte na horizontal, partindo da base até a altura de 1 cm, após este corte a base foi retirada e então realizado um novo corte, porém esse na vertical (Figura 12).

Figura 12: CPs após os cortes



Fonte: Autor, 2019.

¹⁰ Meshfree segundo Garg e Pant (2018), é um método usado para estabelecer equações algébricas do sistema para todo o problema sem o uso de uma malha predefinida. Ele usa um conjunto de pontos espalhados no domínio do problema, bem como nos limites para representar o domínio do problema e seus limites. Esse conjunto de pontos dispersos é chamado de nós de campo ou simplesmente nós.

Os modelos maiores, tiveram configurações de corte diferente, os modelos Z10A39-50 e Z10A19-100, foram cortados horizontalmente nas alturas de 5 cm e 7,5 cm, depois as bases com altura de 5 cm foram cortadas ao meio no sentido vertical, dividindo cada modelo em quatro partes. O objetivo foi visualizar sua estrutura interna em dois pontos horizontais e o comportamento interno de suas fibras ao longo dos 5 cm, através do corte vertical.

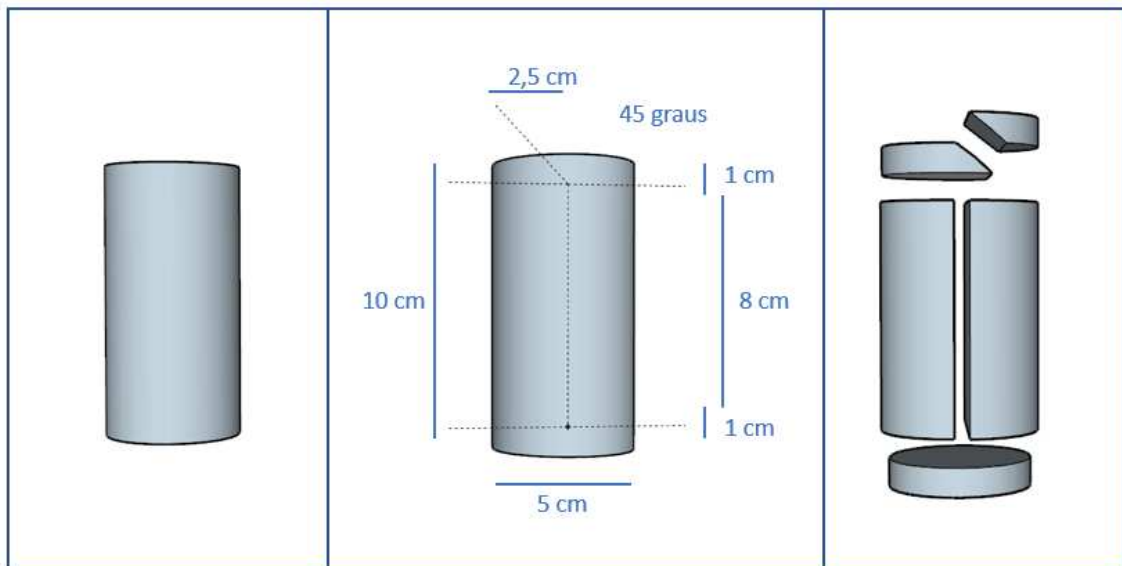
Já o modelo Z10A09-100, foi cortado de forma diferente, teve dois cortes horizontais, um de baixo para cima e um de cima para baixo ambos na altura de 1 cm, um corte vertical na parte central da peça e por último, um corte na transversal da peça superior. A Figura 13 representa o CP em seu processo de corte.

Figura 13: Processo de corte do CP Z10A09-100

(a) CP sem modificações

(b) Determinação dos cortes do CP

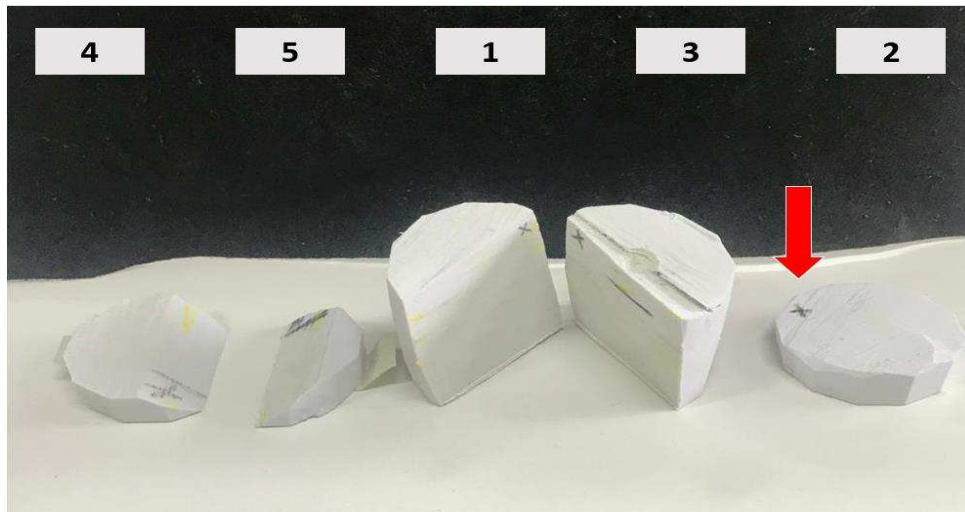
(c) CP após os cortes



Fonte: Autor, 2019.

A Figura 14 exibe o CP Z10A09-100 seccionado e separado, cada peça recebeu um número, neste caso de 1 a 5, para facilitar a compressão de todo o processo, desde os tipos de corte, as orientações da impressão até a sua análise no microscópio. Observação, todos os CPs foram cortados e suas devidas partes numeradas. Na parte cinco retratada na ponta direita da imagem, é visualizado a marcação de um X, deu-se devido a algumas peças apresentarem mais de uma face cortada, dessa forma foi possível determinar o ponto específico da foto retirada pelo microscópio, mesmo após toda a análise.

Figura 14: Separação das peças do CP Z10A09-100

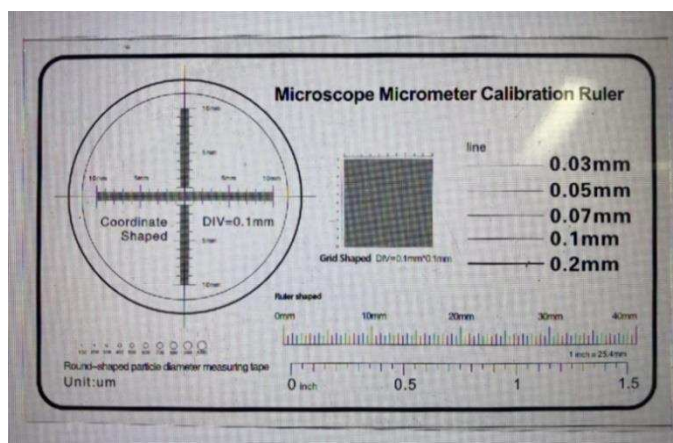


Fonte: Autor, 2019.

Importante ressaltar também que os cortes foram realizados de formas distintas, alguns seguindo a orientação das fibras e outros no sentido inverso das fibras, para proporcionar uma melhor e mais completa visualização no microscópio. Foi utilizado um microscópio digital USB zoom 1600x e o software utilizado foi o Micam 2.0. As fotos foram tiradas e divididas de acordo com a distância, sendo elas de 2,5 cm, 5,0 cm e 10,0 cm de altura entre os CPs e o microscópio.

Segundo Esmaeili e Ebadi, (2017), não há parâmetros fixos para a calibração da câmera do microscópio digital, devido à combinação das lentes no processo de geração de imagens. Portanto, o conjunto de parâmetros de orientação interior da câmera pode ser estimado em cada projeto com um número apropriado de imagens usando o método de auto-calibração. Um dos métodos mais frequentes para fazer medições reais em imagens microscópicas é o uso de régua de calibração de micrômetros para microscópio (Figura 15).

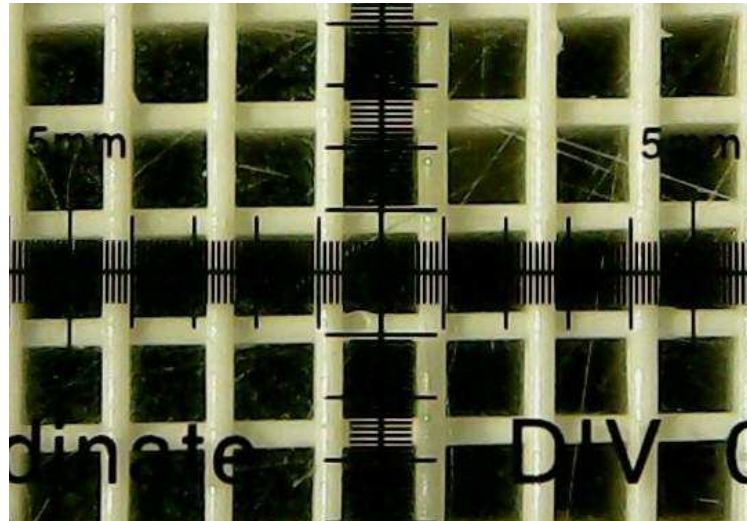
Figura 15: Régua de calibração microscópica.



Fonte: Autor, 2019.

Para obter os comprimentos reais nas medições fotográficas, as marcas de verificação disponível nas imagens podem ser medidas com a ajuda de uma régua de calibração a uma distância focal variável e pré-determinada (2,5 cm, 5,0 cm e 10,0 cm). A Figura 16, apresenta o CP e por cima a régua, onde as marcas de verificação podem ajudar a fazer as medições também nas imagens originais.

Figura 16: Régua de calibração sobre o CPs



Fonte: Autor, 2019.

Paralelo ao processo da digitalização das fotografias, foi realizado um método para enumerá-las automaticamente, sendo então necessário criar uma planilha para separação adequada, em que cada número da peça recebe os números de suas fotos. O Quadro 6 apresenta a planilha das fotos.

Quadro 6: Separação das fotos dos CPs

Nome do CPs	Nº peça	Nº fotos	Nº peça	Nº fotos	Nº peça	Nº fotos	Nº peça	Nº fotos
Z5A09-50	1	100 a 104	2	105 a 110	3	111 a 116	4	
Z5A09-100	1	135 a 139	2	140 a 143	3	144 a 150	4	
Z5A19-50	1	67 a 73	2	74 a 77	3	78 a 82	4	
Z5A19-100	1	151 a 156	2	157 a 162	3	163 a 169	4	
Z5A39-50	1	83 a 87	2	88 a 93	3	94 a 99	4	
Z5A39-100	1	117 a 121	2	122 a 126	3	127 a 134	4	
Z10A09-100	1	1 a 5	2	6a11	3	12 a 15	4	16 a 22
Z10A19-100	1	30 a 32	2	33 a 35	3	36 a 38	4	39 a 43
Z10A39-50	1	44 a 50	2	51 a 56	3	57 a 62	4	63 a 66

Fonte: Autor, 2019.

Após a produção de 196 imagens, foi realizada a etapa de análise das fibras e camadas internas dos CPs, cujos resultados serão apresentados no capítulo seguinte.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esse capítulo destina-se a apresentar os resultados finais da pesquisa, subdivididos em quatro etapas:

- IMPRESSÃO E ENSAIOS MECÂNICOS, apresentando os resultados das impressões e dos ensaios mecânicos dos novos CPs;
- COMPARAÇÃO, os resultados da etapa anterior são comparados com a pesquisa realizada por Martinez et al. (2017);
- SIMULAÇÃO, visa comparar os resultados dos ensaios, com a simulação computacional utilizando os valores de resistência aferidos nos ensaios, aproxima-se ou prevê o comportamento mecânico e deformação dos sólidos submetidos às mesmas cargas;
- ANÁLISE MICROSCÓPICA, destinada a compreensão das fibras internas que formam os CPs, antes e após os ensaios.

4.1 PRIMEIRA ETAPA: IMPRESSÃO E ENSAIOS MECÂNICOS

Esta etapa apresenta os resultados dos ensaios realizados nos novos CPs. Os CPs menores (2,5 x 5,0 cm) foram os primeiros a serem ensaiados, na prensa manual, uma vez que suas dimensões reduzidas inviabilizaram o teste na EMIC. O Quadro 7 apresenta os parâmetros resultantes dos ensaios, utilizados para os cálculos de resistência à compressão de cada CP, bem como os valores de resistência à compressão encontrados para cada modelo.

Quadro 7: Resultado dos ensaios nos CPs 2,5 x 5,0 cm

Nome	Altura após o ensaio (mm)	Diâmetro após o ensaio (mm)	Área (mm ²)	Carga (Kgf)	Resistência à compressão (MPa)
Z5A09-50	49,2	25,0	491	828	17,2
Z5A09-100	48,4	25,0	491	1719	35,7
Z5A19-50	47,7	26,2	541	619	11,6
Z5A19-100	49,4	25,0	493	2206	45,6
Z5A39-50	44,3	26,1	537	529	10,0
Z5A39-100	44,4	26,3	545	1844	34,5

Fonte: Autor, 2019.

A Figura 17 apresenta os seis CPs de menor tamanho (2,5 x 5,0 cm) antes dos ensaios, começando pelo Z5Z39-100 até o Z5Z09-50, respectivamente.

Figura 17: CPs 2,5 x 5,0 cm



Fonte: Autor, 2019.

O Quadro 8, apresenta os resultados obtidos no CPs maiores (5,0 x 10,0 cm), e suas principais características. Graças aos ensaios realizados na EMIC (ANEXO 1, 2 e 3), foi possível encontrar além da resistência à compressão, o módulo elástico; esses valores servem de comparativo e de parâmetro para as avaliações dos demais CPs. Foi possível também encontrar valores meticulosos de antes e depois dos ensaios, esses valores servirão de dados para que possam ser realizadas as simulações estruturais dos CPs no software Scan & Solve.

Quadro 8: Resultados dos ensaios nos CPs 5,0 x 10,0 cm

Nome	Unidade de Medida	Z10A09-100	Z10A19-100	Z10A39-50
Maior Altura antes do ensaio	(mm)	100	100	100
Maior Altura após o ensaio	(mm)	78,4	78,4	87,7
Menor altura antes do ensaio	(mm)	100	100	99,7
Menor Altura após o ensaio	(mm)	76,7	76,7	87,4
Diâmetro superior antes do ensaio	(mm)	48,4	48,4	48,6
Diâmetro superior após o ensaio	(mm)	51,3	51,4	48,8
Diâmetro intermediário antes do ensaio	(mm)	48,5	48,6	48,3
Diâmetro intermediário após o ensaio	(mm)	56,6	56,5	48,9
Diâmetro inferior antes do ensaio	(mm)	48,4	48,5	48,7
Diâmetro inferior após o ensaio	(mm)	51,3	50,6	49,3
Área	mm²	1847	1844	1847
Resistência à compressão	MPa	57,12	56,74	43,30
Módulo de Elasticidade	GPa	1,396		

Fonte: Autor, 2019.

Dado o exposto, é possível notar que há uma expressiva diferença nos resultados dos CPs menores mais resistentes, quando comparado com os CPs maiores mais resistentes; embora tenha obtido um bom resultado no modelo Z5A19-100 (45,67 MPa), ele não foi suficiente para superar os 57,12 MPa do modelo Z10A09-100.

Importante dizer que a proporção das dimensões dos dois grupos de CPs foi de 1X2 (largura x altura), mantendo a proporção dos ensaios anteriores de Martinez et al. (2017), no entanto pode-se considerar que a melhor proporção não seja essa, havendo assim a necessidade de estudos futuros para determinação da melhor medida para obtenção de uma maior resistência mecânica para os modelos propostos. Além dos resultados relacionados a resistência à compressão, foi possível obter também o MOE, que serviu como balizador para as próximas etapas.

Outro ponto importante que esta etapa forneceu, são as alterações físicas nos CPs. Após os ensaios mecânicos realizados nos CPs, praticamente todos os módulos sofreram algum tipo de deformação. Cada tipo de deformação é caracterizado por detalhes que variam da geometria interna da malha, até o acabamento externo da peça. Essas deformações, resultantes dos ensaios, serão comparadas com as deformações resultantes das simulações mecânicas computacionais.

As figuras 18 e 19 apresentam os CPs ensaiados (Z5A39-50, Z5A39-100, Z5A19-50, Z5A19-100, Z5A09-50, Z5A09-100) e suas respectivas deformações. As vistas frontais ilustram as deformações verticais, enquanto as vistas superiores, apresentam as deformações nas seções horizontais da peça.

Figura 18: Vista frontal dos CPs de 5 cm após ensaio mecânico



Fonte: Autor, 2019.

Em geral os CPs sofreram deformações verticais, os menores (2,5 x 5,0 cm) tiveram uma redução máxima de altura em aproximadamente 6%, enquanto os modelos maiores (5,0 x 10,0 cm) reduziram aproximadamente 19%. Essa diferença, deu-se principalmente pela estrutura interna (sólidos 100% e malha 50%), devido as alturas diferentes e também pelo tipo de ensaio realizado, os modelos menores foram utilizados a prensa manual e para os maiores a máquina universal (automatizada).

Figura 19: Vista superior dos CPs de 5 cm após ensaio mecânico



Fonte: Autor, 2019.

A seguir será realizada de forma mais detalhada a exposição de cada CP ensaiado, partindo dos modelos reais até os simulados, apresentando suas características e comportamento após os ensaios e as informações a respeito das mudanças físicas (altura, largura, diâmetro...) que também podem ser encontradas no Quadro 7 (CPs altura 5 cm) e no Quadro 8 (CPs altura 10 cm).

A Figura 20 indica as deformações do modelo Z5A39-50, exibe além de esmagamento, expansão lateral em formato arredondado em sua base e topo, exibe também variação longitudinal e sinais de flambagem.

Figura 20: CP Z5A39-50 após ensaio mecânico



Fonte: Autor, 2019.

O modelo Z5A39-100 apresentou sinais de flambagem, cisalhamento e deformação longitudinal, importante ressaltar que este CP, teve um erro na sua base de aderência com a impressora. Em situações normais, esta normalmente é extraída; porém neste caso, exigiu extração manual e lixamento da peça, o que pode ter favorecido esse comportamento de deformação da peça após ensaios (Figura 21).

Devido a estes fatores pode-se concluir que, alguns dos CPs que tiveram problema na impressão e ou na base de aderência, apresentaram também problemas nos ensaios, ocasionando resultados diferentes dos previstos.

Figura 21: CP Z5A39-100 após ensaio mecânico



Fonte: Autor, 2019.

Já o modelo Z5A19-50 apresentou sinais de esmagamento, expansão lateral em formato arredondado no topo, exibe também uma pequena variação longitudinal, flambagem e um início de cisalhamento na parte que expandiu (Figura 22).

Figura 22: CP Z5A19-50 após ensaio mecânico



Fonte: Autor, 2019.

O CP Z5A19-100 apresentou singelos sinais de flambagem na parte superior, que tendeu a uma pequena variação longitudinal e apresentou um esmagamento baixo (0,55 mm). Foi concluído que o principal motivo do CP ter apresentado esta leve variação longitudinal, foi devido ao problema de impressão e descolamento da base que acarretou a correção da base de forma manual. É possível afirmar também que caso a base estivesse em perfeito estado, provavelmente o CP não tivesse apresentado este comportamento (Figura 23).

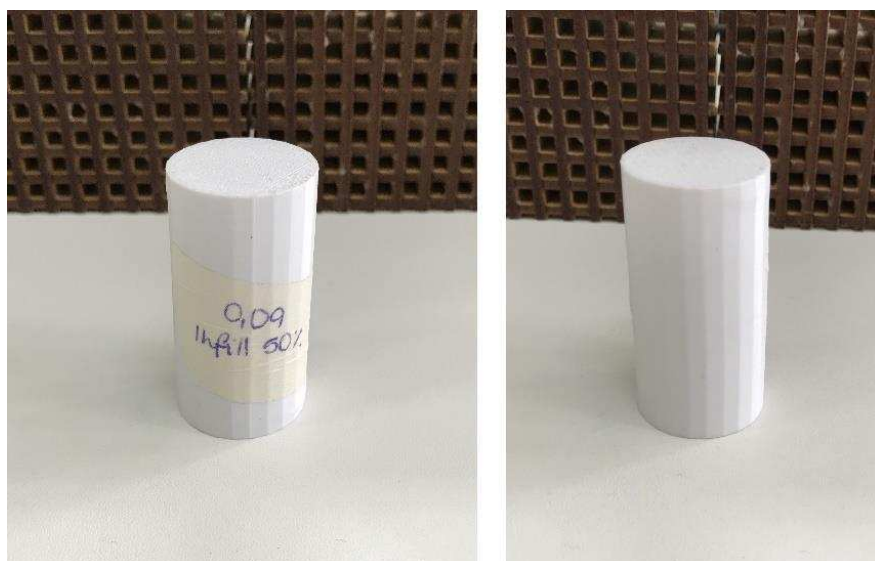
Figura 23: CP Z5A19-100 após ensaio mecânico



Fonte: Autor, 2019.

A Figura 24 ilustra o modelo Z5A09-50 que apresentou sinais de compressão homogênea com deformação em sua altura, um esmagamento de 0,75 mm.

Figura 24: CP Z5A09-50 após ensaio mecânico



Fonte: Autor, 2019.

A Figura 25 demonstra que o CP Z5A09-100 apresentou sinais de compressão homogênea com deformação em sua altura, um esmagamento de 1,60 mm, um resultado acima da média esperada. O principal motivo para esta deformação fora dos padrões foi o descolamento da base de aderência, que mais uma vez fora necessário a manutenção manual da base (lixamento para aplainar).

Figura 25: CP Z5A09-100 após ensaio mecânico



Fonte: Autor, 2019.

O CP Z10A39-50 apresentou sinais de instabilidade compressiva¹¹ devido ao amolecimento do material por efeito de carga, rompimento da base, aumento do diâmetro e esmagamento. Importante ressaltar que devido ao rompimento da base e do baixo resultado referente a resistência à compressão, devido ao rompimento da base e à baixa resistência ao esforço de compressão, o ensaio não pode ser concluído e o módulo de elasticidade não foi aferido (Figura 26).

Figura 26: CP Z10A39-50 após ensaio mecânico

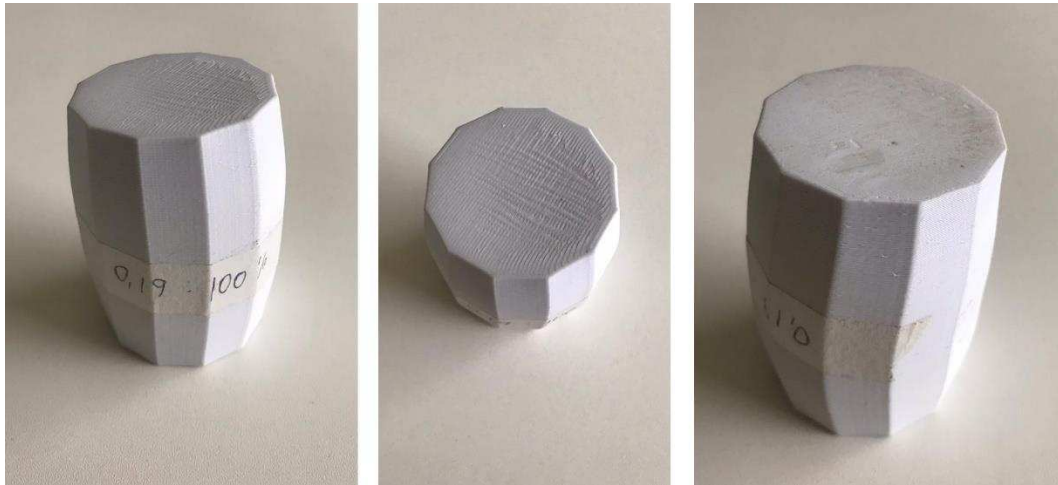


Fonte: Autor, 2019.

¹¹ Instabilidade Compressiva: quando um corpo, submetido a um ensaio de compressão, tende a deformar sua base gerando amolecimento do material por efeito de carga.

O modelo Z10A19-100 apresentou sinais de compressão em formato de barril, variação longitudinal e uma taxa de esmagamento razoável, apresentou também problemas no descolamento da base na retirada da impressão, sendo necessário o lixamento manual da base, no entanto o CP apresentou resultados positivos mesmo com a falha na base (Figura 27).

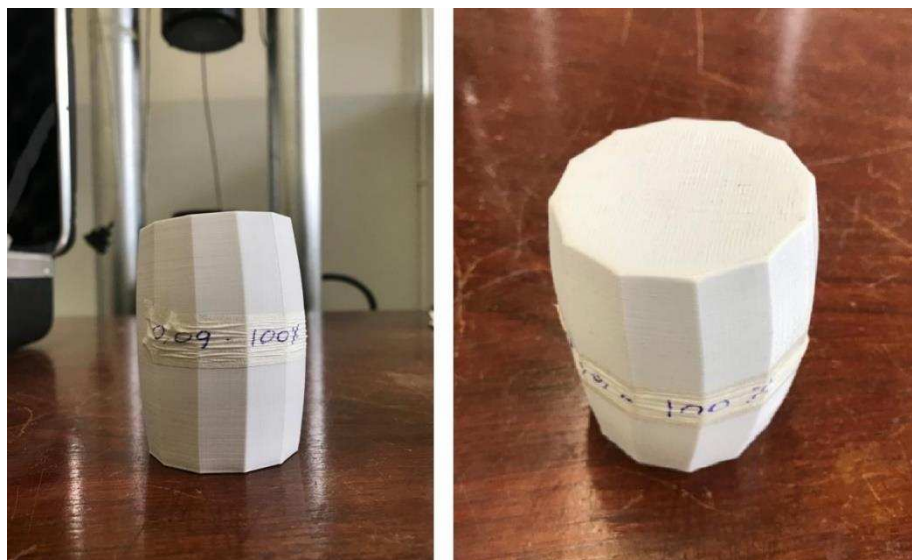
Figura 27: CP Z10A19-100 após ensaio mecânico



Fonte: Autor, 2019.

Para o modelo CP Z10A09-100 (Figura 28) assim como na Figura 27 apresentou sinais de compressão em formato de barril, variação longitudinal e uma taxa de esmagamento razoável, a impressão não apresentou problemas, os resultados finais foram positivos e por fim, fora possível realizar o módulo elástico do mesmo, o qual serviu de parâmetro para as simulações.

Figura 28: CP Z10A09-100 após ensaio mecânico



Fonte: Autor, 2019.

4.2 SEGUNDA ETAPA: COMPARAÇÃO

Esta etapa foi destinada a realizar a comparação dos resultados obtidos da etapa anterior com os resultados e informações disponibilizadas na pesquisa realizada por Martinez et al., (2017). A princípio foi explorado os dados referentes ao tempo de impressão, posteriormente a quantidade de material gasto nas impressões e por fim os resultados dos ensaios.

O Quadro 9 apresenta o tempo de impressão demandado para cada corpo de prova cilíndrico analisado nesta pesquisa. Os CPs também foram divididos e analisados de acordo com sua massa. Além de revelar o tempo de impressão e a massa de cada elemento o quadro exhibe os totais referentes às duas impressoras, do lado esquerdo a Zortrax (amarelo) e do lado direito a Cubex (verde), organizados desta forma para que ambas pudessem ser comparadas.

Quadro 9: Comparativo material e tempo de impressão (Zortrax X Cubex)

Nome	Uso de material (gramas)	Tempo estimado de impressão (HH: MM: SS)	Tempo estimado de impressão (HH: MM: SS)	Uso de material (gramas)	Nome
Z5A09-50	12,00	2:17:00	4:51:00	10,20	C5A10-50
Z5A09-100	24,00	5:21:00	5:17:00	25,83	C5A10-100
Z5A19-50	12,00	1:13:00	2:04:00	8,67	C5A25-50
Z5A19-100	25,00	2:54:00	2:06:00	25,78	C5A25-100
Z5A39-50	12,00	0:37:00	0:35:00	10,64	C5A50-50
Z5A39-100	24,00	1:18:00	1:03:00	25,67	C5A50-100
Z10A09-50	78,00	12:44:00	8:52:00	60,49	C10A10-50
Z10A09-100	177,00	37:28:00	37:38:00	206,50	C10A10-100
Z10A19-50	76,00	6:44:00	3:45:00	46,97	C10A25-50
Z10A19-100	193,00	21:16:00	15:02:00	206,24	C10A25-100
Z10A39-50	66,00	3:08:00	2:18:00	58,36	C10A50-50
Z10A39-100	181,00	8:52:00	7:31:00	205,81	C10A50-100
TOTAL	880,00	103:52:00	91:02:00	891,16	TOTAL

Fonte: Autor, 2019.

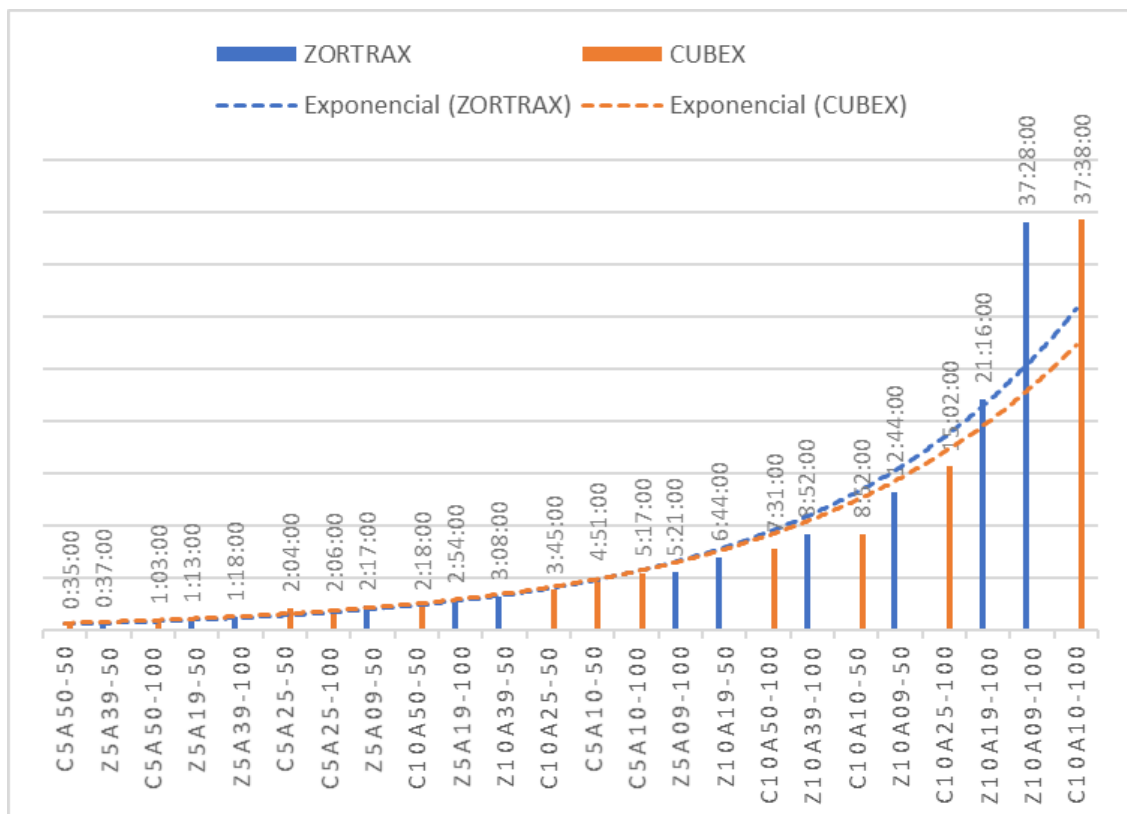
É importante ressaltar que a Cubex possui como configuração padrão, espessuras de camada 0,10; 0,25 e 0,50 mm, enquanto a Zortrax apresenta espessuras de camada mais finas 0,09; 0,19 e 0,39 mm. Para efeito deste trabalho, foram comparadas a Zortrax com a Cubex da seguinte forma: (0,09 x 0,10), (0,19 x 0,25) e (0,39 x 0,50) respectivamente.

Apesar da Zortrax trabalhar com mais precisão e resolução de impressão, ela foi mais eficiente e econômica no consumo de material. A diferença entre as camadas impressas pelas duas impressoras configura a diferença entre os CPs, essa variação que não ultrapassa a

casa dos 25%, promove uma pequena mudança nos modelos, essa diferença pode ser vista tanto no tempo de impressão quanto na sua massa.

No Gráfico 2 é apresentado o tempo de impressão para cada CP em ordem crescente, onde é possível observar a significativa diferença de tempo entre as impressões (tanto para Zortrax quanto para Cubex). Através da curva exponencial é observado o maior tempo de impressão gasto pela Zortrax.

Gráfico 2: Tempo de impressão dos CPs



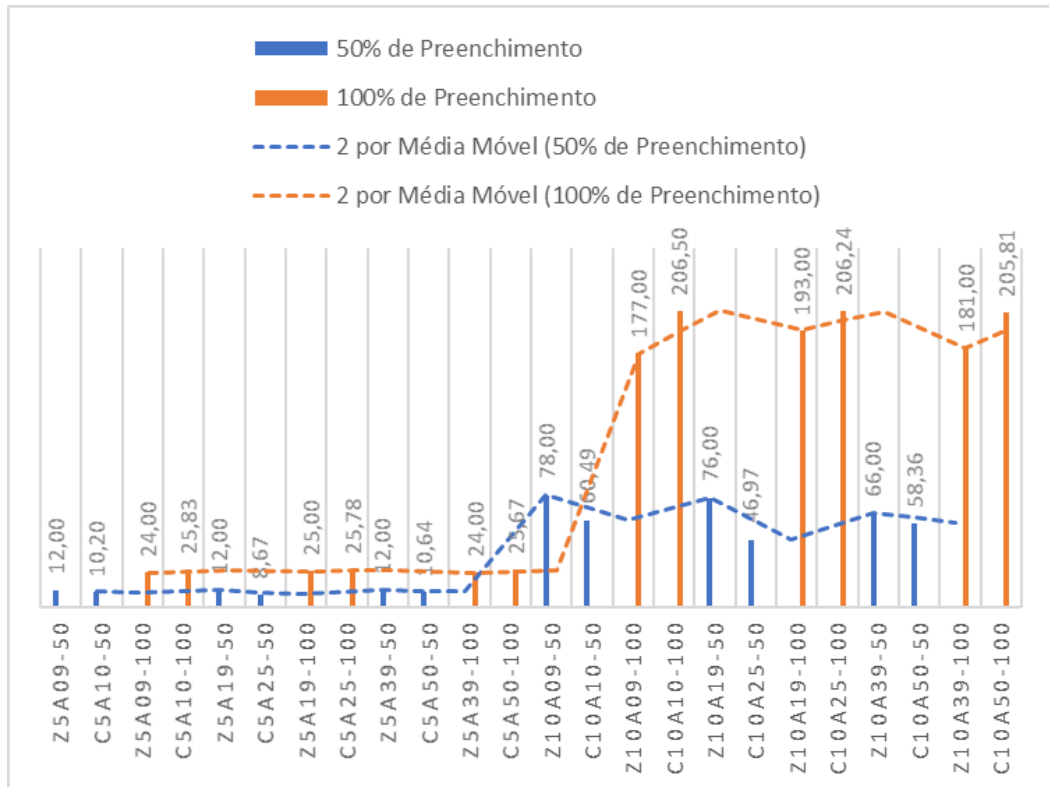
Fonte: Autor, 2019.

Os CPs impressos pelas duas impressoras, foram projetados para serem os mais próximos possíveis uns dos outros, para que suas características físicas apresentassem similaridade principalmente se tratando de análise mecânica.

Quanto ao tempo de impressão, a Zortrax apresentou um total de 103:52:00 (HH:MM:SS), já a Cubex um total de 91:02:00 (HH:MM:SS). Apesar do consumo de material ser menor na Zortrax, o tempo de impressão é superior.

No Gráfico 3 é apresentado paralelamente os CPs da Zortrax e da Cubex de acordo com sua porcentagem de preenchimento, 50% com 50% e 100% com 100% separando-os da seguinte forma: (0,09 x 0,10), (0,19 x 0,25) e (0,39 x 0,50). A Zortrax consumiu um total de aproximadamente 880 gramas de ABS para realizar todas as impressões, já a Cubex consumiu um total de aproximadamente 890 gramas de ABS.

Gráfico 3: Massa em gramas dos CPs



Fonte: Autor, 2019.

O Quadro 10 apresenta os CPs impressos pela impressora Zortrax e Cubex, dispostos lado a lado, para facilitar a visualização dos seus resultados. No lado direito é possível observar a ausência de três resultados, essa inexistência se deu, devido a ao quadro informativo da pesquisa anterior, não estar completo. Por fim, foi realizado os comparativos relacionados às análises mecânicas, após o processo de ensaio e com todos os resultados disponíveis, foi possível determinar que os CPs Z10A09-100 e C10A10-100 apresentam resistência à compressão, os valores mais altos encontrados.

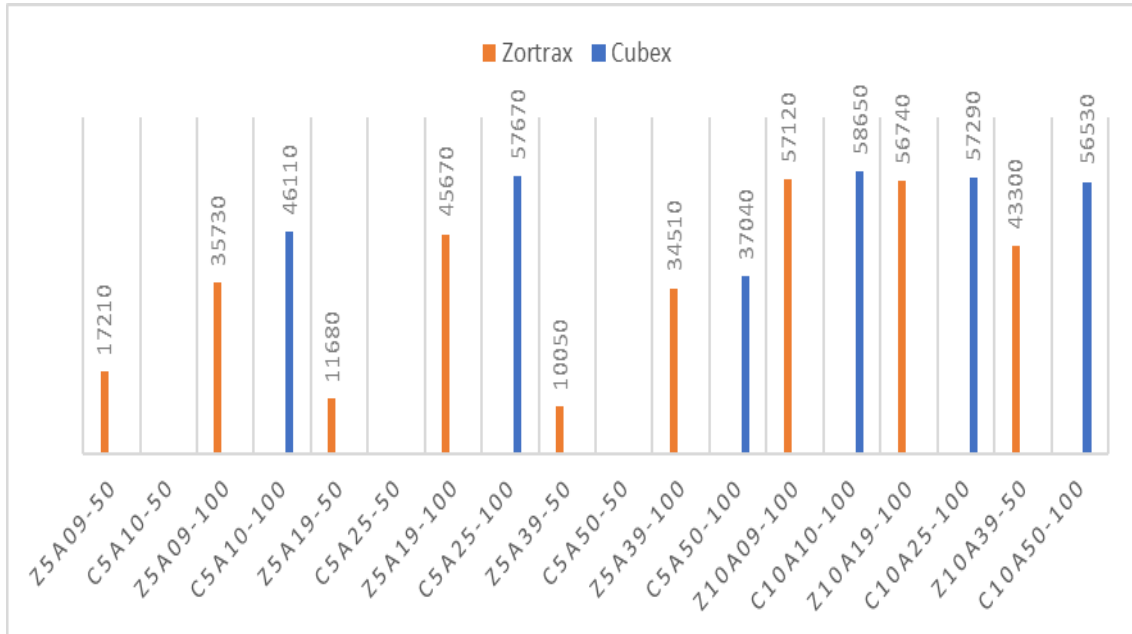
Quadro 10: Comparativo Resistência à Compressão (Zortrax X Cubex)

Nome (Zortrax)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à compressão (MPa)	Nome (Cubex)
Z5A09-50	17,2		C5A10-50
Z5A09-100	35,7	46,1	C5A10-100
Z5A19-50	11,6		C5A25-50
Z5A19-100	45,6	57,6	C5A25-100
Z5A39-50	10,0		C5A50-50
Z5A39-100	34,5	37,0	C5A50-100
Z10A09-100	57,1	58,6	C10A10-100
Z10A19-100	56,7	57,2	C10A25-100
Z10A39-50	43,3	56,5	C10A50-100

Fonte: Autor, 2019.

Tendo em vista os valores dos resultados apresentados, é possível perceber que as camadas com menor espessura, possuem maior resistência, no entanto essa diferença só tem impacto relevante quando a variação da camada for superior a 10%. Por esse motivo não há grande discrepância de resultados quando comparado os resultados de compressão das duas impressoras (Gráfico 4).

Gráfico 4: Comparativo (Resistência à compressão) Zortrax X Cubex



Fonte: Autor, 2019.

Os melhores modelos apresentaram resultados relativamente elevados tendo em vista os resultados obtidos pelos outros modelos. O Z10A09-100 foi o CPs mais resistente da Zortrax, resistiu a uma carga de aproximadamente 58 MPa e o C10A10-100 foi o CPs mais resistente da Cubex, que registrou aproximadamente 59 MPa, ambos para compressão axial.

Assim como explicitado anteriormente, as duas impressoras apesar de possuírem alguns anos de diferença, tecnologias e preços distintos, compartilham de um processo em que o tempo de impressão e a quantidade de material utilizado, tentem a serem próximos. No entanto, um diferencial que pode ser observado é na qualidade final de acabamento dos CPs, na qual a impressora Zortrax apresenta um acabamento mais refinado.

4.3 TERCEIRA ETAPA: SIMULAÇÃO

Esta etapa apresentou um acervo maior de informações, visto que cada etapa utiliza informações e dados da anterior, nessa específica etapa, são apresentados os resultados referentes às medidas de dispersão, os parâmetros e os resultados obtidos para e através das simulações.

Os resultados pertinentes às medidas de dispersão estão expressos no Quadro 11, separados de acordo com o tipo de impressora, tamanho e preenchimento. O quadro foi desenvolvido separando os CPs em um total de nove grupos, os resultados foram mesclados de acordo com suas características. Como resultado foi obtido a média, o desvio padrão simples, a variância populacional e o coeficiente de variação populacional, o qual determina o quanto cada grupo variou internamente seus resultados. A média foi a principal e teve suma importância para as simulações, foi através dela que as cargas foram geradas para alimentar os requisitos do software.

Estes resultados são utilizados nessa etapa como base e parâmetro regulamentador, para simulação do CPs através do software. Importante ressaltar que os valores contidos nesse quadro, foram apresentados em Pa, para facilitar a entrada de dados no Scan & Solve, tendo em vista os padrões pré-estabelecidos pelo programa.

Através do banco de dados criado, foi desenvolvido padrões a serem utilizados na simulação, validando assim a importância das medidas de dispersão na pesquisa. Através do Quadro 11, foi possível perceber que os grupos de CPs que menos sofreram variações (Coeficiente de Variação Populacional) foram os modelos CPs Z10A-50% (ZORTRAX), CPs Z10A-100% (ZORTRAX) e CPs 10A-100% (CUBEX + ZORTRAX), exibindo resultados muito baixos, entre 0 e 1,30 %.

As duas últimas colunas do Quadro 11 foram criadas com o intuito de desenvolver um critério quando se compara as duas impressoras e seus respectivos CPs, além de servir como base para análise dos modelos testados e suas medidas de dispersão calculadas.

Os CPs impressos pela Zortrax e Cubex apresentam um grau de representatividade alto e variações baixas, promovendo maior segurança quanto a análises em modelos impressos, principalmente quando se trata de melhoria física, estrutural e geométrica em modelos 3D. Os ensaios realizados servem como principal parâmetro para realização de simulações e as quantificações das variações dos dados.

Quadro 11: Resultados das Medidas de Dispersão dos CPs

NOME	CPs Z5A-50% (ZORTRAX)	CPs Z5A-100% (ZORTRAX)	CPs Z10A-50% (ZORTRAX)	CPs Z10A-100% (ZORTRAX)	CPs 5A-100% (CUBEX + ZORTRAX)	CPs 10A-100% (CUBEX + ZORTRAX)	Todos os CPs (CUBEX)	Todos os CPs (ZORTRAX)	Todos os CPs (CUBEX + ZORTRAX)
	Resistência Efetiva (MPa)	Resistência Efetiva (MPa)	Resistência Efetiva (MPa)	Resistência Efetiva (MPa)	Resistência Efetiva (MPa)	Resistência Efetiva (MPa)	Resistência Efetiva (MPa)	Resistência Efetiva (MPa)	Resistência Efetiva (MPa)
C5A10-100					46,11		46,11		46,11
C5A25-100					57,67		57,67		57,67
C5A50-100					37,04		37,04		37,04
C10A10-100						58,65	58,65		58,65
C10A25-100						57,29	57,29		57,29
C10A50-100						56,53	56,53		56,53
Z5A09-50	17,21							17,21	17,21
Z5A09-100		35,73			35,73			35,73	35,73
Z5A19-50	11,68							11,68	11,68
Z5A19-100		45,67			45,67			45,67	45,67
Z5A39-50	10,05							10,05	10,05
Z5A39-100		34,51			34,51			34,51	34,51
Z10A09-100				57,12		57,12		57,12	57,12
Z10A19-100				56,74		56,74		56,74	56,74
Z10A39-50			43,30					43,30	43,30
Média	12,98	38,64	43,30	56,93	42,79	57,27	52,22	34,67	41,69
Desvio Médio Simples	2,82	4,69	0,00	0,19	7,03	0,56	7,09	14,49	13,85
Desvio Padrão Populacional	3,06	5,00	0,00	0,19	8,08	0,74	7,99	17,09	16,57
Coefficiente de Variação Populacional	23,61%	12,94%	0,00%	0,33%	18,90%	1,30%	15,30%	49,28%	39,75%

Fonte: Autor, 2020.

A partir dos dados encontrados no quadro anterior, foi possível iniciar o processo para realização da simulação. Os parâmetros foram definidos e aplicados de acordo com as características do programa. Através dos cálculos para as medidas de dispersão realizadas na etapa anterior, foi possível criar parâmetros para simulação, junto às informações descobertas ao longo da pesquisa. Para os parâmetros escolhidos, foram montados três grupos descritos a seguir:

- a) ABS – composto por padrões estabelecidos no portfólio do próprio Scan & Solve, onde, apenas a carga externa foi alterada e selecionada de acordo com a carga encontrada nos ensaios mecânicos reais, apresenta também Coeficiente de Poisson 0,35 (Quadro 12).

Quadro 12: Modelo ABS

Property	Value
Description	ABS
Density	1.049e-09 Mg/mm ³
Elastic Modulus	2400 MPa
Default Failure Criterion	von Mises
Tensile Yield Strength	44.8 MPa

Fonte: Autor, 2020.

- b) ABS - ZORTRAX E ENSAIOS – composto por padrões baseados nos dados fornecidos pela Zortrax (density e Poisson ratio) e nos ensaios (elastic modulus). A carga externa foi alterada de acordo com os valores encontrados nos ensaios mecânicos reais, apresenta também Coeficiente de Poisson 0,48 (Quadro 13).

Quadro 13: ABS - ZORTRAX E ENSAIOS

Property	Value
Description	ABS - ZORTRAX E ENSAIOS
Density	1.195e-09 Mg/mm ³
Elastic Modulus	1396 MPa
Default Failure Criterion	von Mises
Tensile Yield Strength	44.8 MPa

Fonte: Autor, 2020.

- c) ABS - STANDARD DEVIATION MODEL – composto por padrões baseados nas médias dos dois modelos anteriores, servindo como parâmetro intermediário, alterando a carga externa de acordo com a carga encontrada nos ensaios mecânicos reais, apresenta também Coeficiente de Poisson 0,41 (Quadro 14).

Quadro 14: Modelo ABS - STANDARD DEVIATION MODEL

Property	Value
Description	ABS - STANDARD DEVIATION MODEL
Density	1.122e-09 Mg/mm ³
Elastic Modulus	1898 MPa
Default Failure Criterion	von Mises
Tensile Yield Strength	44.8 MPa

Fonte: Autor, 2020.

Após o desenvolvimento destes três parâmetros, foram selecionados de acordo com o Quadro 11, seis resultados a serem simulados, tendo como principais variações suas alturas e camadas de preenchimento, variando também de acordo com a impressora. Os quais foram escolhidos os seguintes modelos para realização das simulações:

- a) a média dos CPs impressos pela Zortrax com altura de 5 cm e preenchimento de 50% (12,98 MPa);
- b) a média dos CPs impressos pela Zortrax com altura de 5 cm e preenchimento de 100% (38,63 MPa);
- c) a média dos CPs impressos pela Zortrax com altura de 10 cm e preenchimento de 50% (43,30 MPa);
- d) a média dos CPs impressos pela Zortrax com altura de 10 cm e preenchimento de 100% (56,93 MPa);
- e) a média dos CPs impressos pela Zortrax mais Cubex com altura de 5 cm e preenchimento de 100% (42,78 MPa);
- f) a média dos CPs impressos pela Zortrax mais Cubex com altura de 10 cm e preenchimento de 100% (57,26 MPa).

Gerando um total de 18 simulações, 3 para cada média escolhida (de “a” até “f”). Dessa forma foi possível gerar resultados que possam ser separados, analisados e discutidos de acordo com as características dos CPs. Importante ressaltar que os parâmetros foram desenvolvidos para que simulação esteja o mais próximo possível com os valores reais, tendo em vista a diferença entre os valores que balizam a simulação, sejam

eles informados pelo software (neste caso o Scan & Solve) ou através dos valores reais encontrados nos ensaios.

Outro fator importante, é que o software não permitiu que os corpos de prova fossem simulados em camadas (layer by layer padrão de impressões 3D em ABS), formando assim uma seleção própria para busca do melhor, médio e pior modelo. Os 18 ensaios estão dispostos nos seguintes anexos (“ANEXO 4” até o “ANEXO 22”).

Os resultados das simulações foram compilados em três tópicos. A primeira parte é composta pela comparação da taxa de deslocamento vertical e horizontal dos CPs, a segunda parte é a análise do Von Mises Stress (VMS) e a terceira parte é a análise das forças aplicadas (Principal Stress) nos CPs.

A primeira parte apresenta como resultado a comparação da variação horizontal/diâmetro dos CPs (Quadro 15). A “média do diâmetro antes do ensaio”, são os valores aferidos nos CPs reais, posteriormente a “média do diâmetro após o ensaio” realizado e as quatro últimas linhas representam, a variação em mm para cada modelo de conjunto de CPs e suas simulações, de acordo com as informações dispostas anteriormente. Todos os valores seguem a mesma ordem das simulações (CPs Z5A-50% (ZORTRAX) até CPs 10A-100% (CUBEX + ZORTRAX)). O quadro também é composto pela comparação da variação vertical/altura dos CPs. Os indicadores são os mesmos do anterior alterando-se apenas a variação horizontal para vertical.

Na comparação do deslocamento horizontal e vertical as simulações são comparadas com a “Taxa Redução Diâmetro após ensaio”. Foi observado que os valores encontrados nas simulações são diferentes dos ensaios, revelando resultados 10 vezes menores que os valores reais, essa diferença pode ser resolvida criando uma taxa de variação (10X). Como solução, os resultados das simulações são compreendidos como cm e não mm, assim como estão nos anexos.

Importante ressaltar que o parâmetro que mais se aproximou dos valores reais para variação horizontal foi o “SIMULAÇÃO - ABS - ZORTRAX E ENSAIOS” e para variação vertical foi o “SIMULAÇÃO - ABS”.

Quadro 15: Comparação do deslocamento Horizontal/Diâmetro e Vertical/Altura

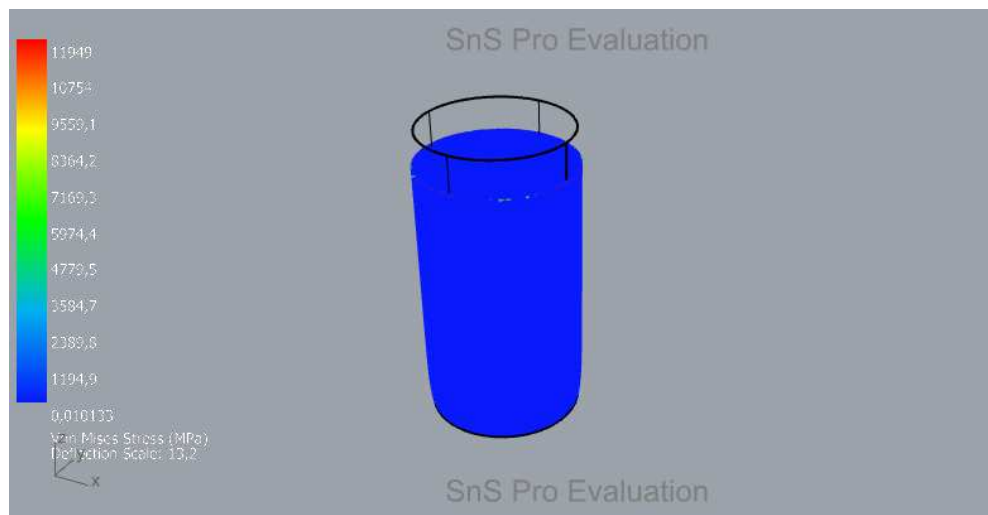
	Unidade de medida	CPs Z5A-50% (ZORTRAX)	CPs Z5A-100% (ZORTRAX)	CPs Z10A-50% (ZORTRAX)	CPs Z10A-100 (ZORTRAX)	CPs 5A-100% (CUBEX + ZORTRAX)	CPs 10A-100% (CUBEX + ZORTRAX)
Valores Inseridos no Scan & Solve	MPa	12,98	38,63	43,30	56,93	42,78	57,26
Média Diâmetro antes do ensaio	(mm)	25,00	25,00	48,53	48,47	25,00	50,00
Média Diâmetro após ensaio	(mm)	25,80	25,47	49,00	52,95	28,97	51,33
Taxa Redução Diâmetro após ensaio	(mm)	0,80	0,47	0,47	4,48	3,97	1,33
SIMULAÇÃO - ABS	(mm)	0,03	0,08	0,19	0,24	0,09	0,12
SIMULAÇÃO - ABS - STANDARD DEVIATION MODEL	(mm)	0,04	0,13	0,29	0,37	0,14	0,19
SIMULAÇÃO - ABS - ZORTRAX E ENSAIOS	(mm)	0,07	0,20	0,45	0,59	0,22	0,30
Média Altura antes do ensaio	(mm)	50,00	50,00	100,00	100,00	50,00	100,00
Média Altura após ensaio	(mm)	47,12	47,43	87,55	77,55	48,80	88,21
Taxa Redução Altura após ensaio	(mm)	2,88	2,57	12,45	22,45	1,20	11,79
SIMULAÇÃO - ABS	(mm)	0,29	0,87	1,95	2,57	0,96	1,29
SIMULAÇÃO - ABS - STANDARD DEVIATION MODEL	(mm)	0,36	1,06	2,38	3,12	1,17	1,57
SIMULAÇÃO - ABS - ZORTRAX E ENSAIOS	(mm)	0,46	1,36	3,04	4,00	1,50	2,01

Fonte: Autor, 2020.

A segunda parte da análise dos resultados é a comparação e discussão do Von Mises Stress. Os resultados obtidos após as simulações comprovaram que os todos os três parâmetros estabelecidos possuem a capacidade de aproximar o VMS a zero, em seu caráter mínimo e em seu caráter máximo, variando de acordo com o tipo de CPs e carga aplicada. Isso significa que o parâmetro estabelecido possui características relevantes, principalmente pelo fato de conseguir aproximar de zero o VMS e também informar o caráter máximo, servindo como balizador da distorção e principal determinador do local de ruptura do CP (Figura 29).

Através desses parâmetros os modelos podem ser qualificados de maneira que suas características possam ser adaptadas para outros tipos de ensaios, onde o balizador pode ser real, simulado e ou alterado de acordo com a finalidade da peça desenvolvida.

Figura 29: Resultados do VMS
(CPs 10A-100% (CUBEX + ZORTRAX))



Fonte: Autor, 2020.

Nos Anexos é possível visualizar os resultados referentes aos Von Mises Stress, que após serem analisados, foi concluído que o parâmetro “ABS - ZORTRAX E ENSAIOS”, possui a configuração mais adequada para encontrar o balizados VMS. A média utilizada nos CPs 10A-100% (CUBEX + ZORTRAX) tiveram como resultados valores para a taxa mínima de zero MPa e para taxa máxima aproximadamente 15% acima do valor real, nos outros parâmetros as taxas possuem variações maiores. A taxa máxima de 15% equivale a um valor adequado para a simulação em questão, tendo em vista todos os pontos que ponderam a equação da simulação (variação de camada, espessura da camada, tipos de ensaios, entre outros).

Por fim, a terceira parte é a análise das forças aplicadas nos CPs (Principal Stress), cujo principal critério comparador é a média da “Max. Principal Stress”. Importante destacar que os resultados das simulações apresentarem valores em MPa, entretanto os resultados encontram-se em uma escala mil vezes maior (1000X) do que os valores reais. A simulação mais uma vez apresentou essa variação de escala nas unidades de medida. O Quadro 16 apresenta os valores encontrados, mais a média dos resultados referentes ao modelo “CPs Z5A-50% (ZORTRAX)”.

Quadro 16: Resultados CPs Z5A-50% (ZORTRAX)

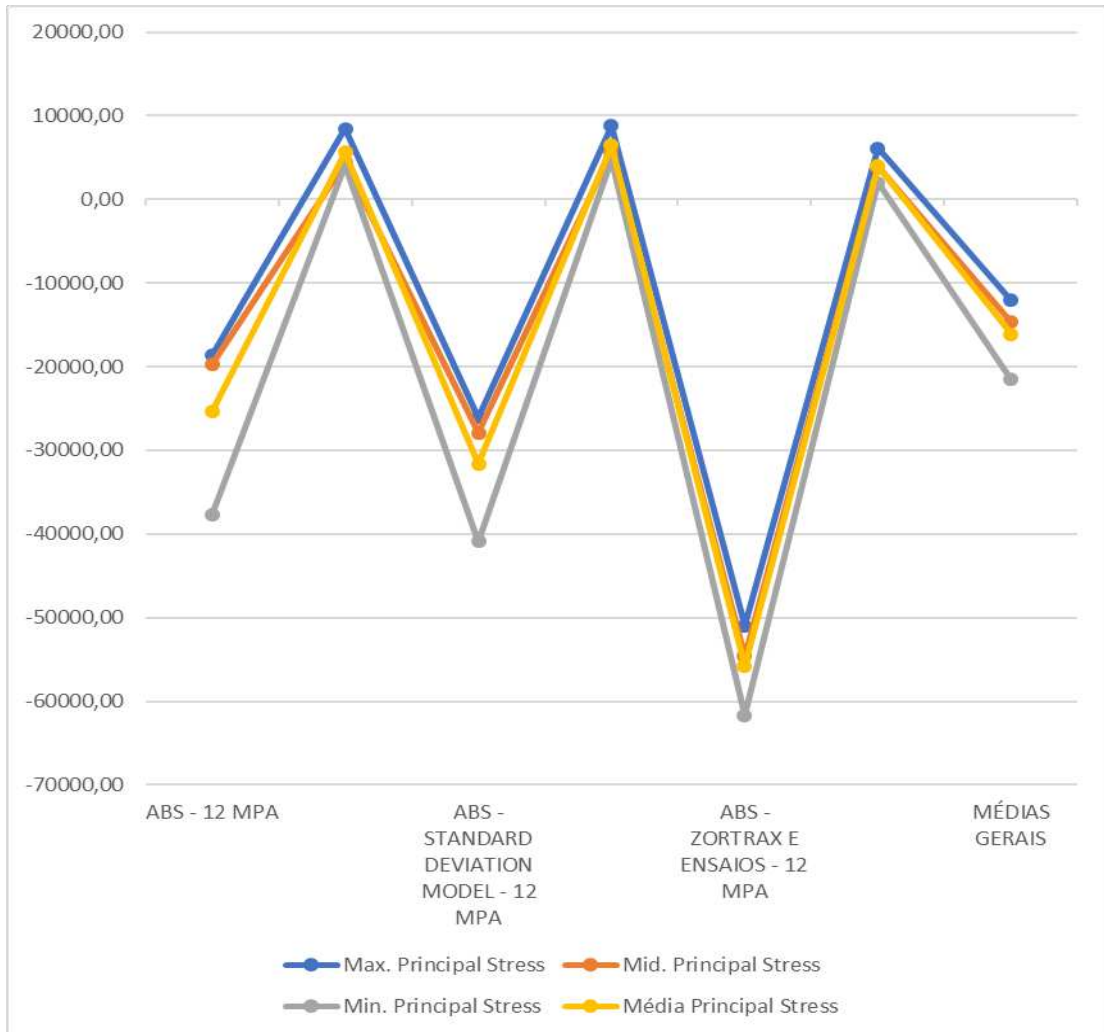
	ABS - 12 MPA		ABS - STANDARD DEVIATION MODEL - 12 MPA		ABS - ZORTRAX E ENSAIOS - 12 MPA		MÉDIAS GERAIS
	MÍNIMO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÁXIMO	
Max. Principal Stress	-18688,00	8444,70	-26069,00	8768,40	-50980,00	6078,50	-12074,23
Med. Principal Stress	-19729,00	4406,00	-27933,00	5679,40	-54598,00	3923,70	-14708,48
Min. Principal Stress	-37724,00	4130,20	-40909,00	4824,70	-61690,00	2001,80	-21561,05
Média Principal Stress	-25380,33	5660,30	-31637,00	6424,17	-55756,00	4001,33	-16114,59

Fonte: Autor, 2020.

Foi encontrado como principal resultado o modelo “CPs Z5A-50% (ZORTRAX)”, esse apresentou no “Max. Principal Stress” uma média geral que teve como resultado praticamente o mesmo valor na simulação e nos ensaios cerca de 12 MPa. Para todos os outros modelos testados a média geral se manteve muito próxima do valor real, avalizando positivamente os resultados das simulações.

Por último é apresentado o Gráfico 5, que evidencia os três parâmetros e a média de suas forças aplicadas, visualizando de forma simplificada os resultados contidos no Quadro 16, promovendo mais uma vez o parâmetro “ABS” - 12 MPA, que em comparação com os outros, mostrou ser a simulação mais próxima dos ensaios, se tratando das forças aplicadas aos CPs (Principal Stress).

Gráfico 5: Forças aplicadas nos CPs



Fonte: Autor, 2020.

4.4 QUARTA ETAPA: ANÁLISE MICROSCÓPICA

Esta etapa destina-se a apresentação dos resultados relacionados à análise microscópica. Após todo o processo de corte dos CPs, e da digitalização das fotos iniciaram-se as análises referentes às peças, assim como explicado na parte da metodologia, cada modelo teve um padrão de corte estabelecido e através desses cortes os pontos/locais a serem analisados foram selecionados.

Devida a precisão do microscópio utilizado, as imagens referentes aos CPs maciços (preenchimento 100%), não apresentaram diferenças visíveis entre suas camadas de preenchimento (Infill %) e entre suas linhas de impressão (Layer mm). A Figura 30 é representada por (a) CPs Z5A39-100 e (b) CPs Z10A09-100, dois modelos que possuem padrões diferentes um do outro, no entanto não foi possível notar diferenças em seu interior, as fotos foram tiradas a uma distância de 5 cm da lente do microscópio até o CPs.

Figura 30: Fotografia microscópica da parte interna de dois CPs

(a) CPs Z5A39-100



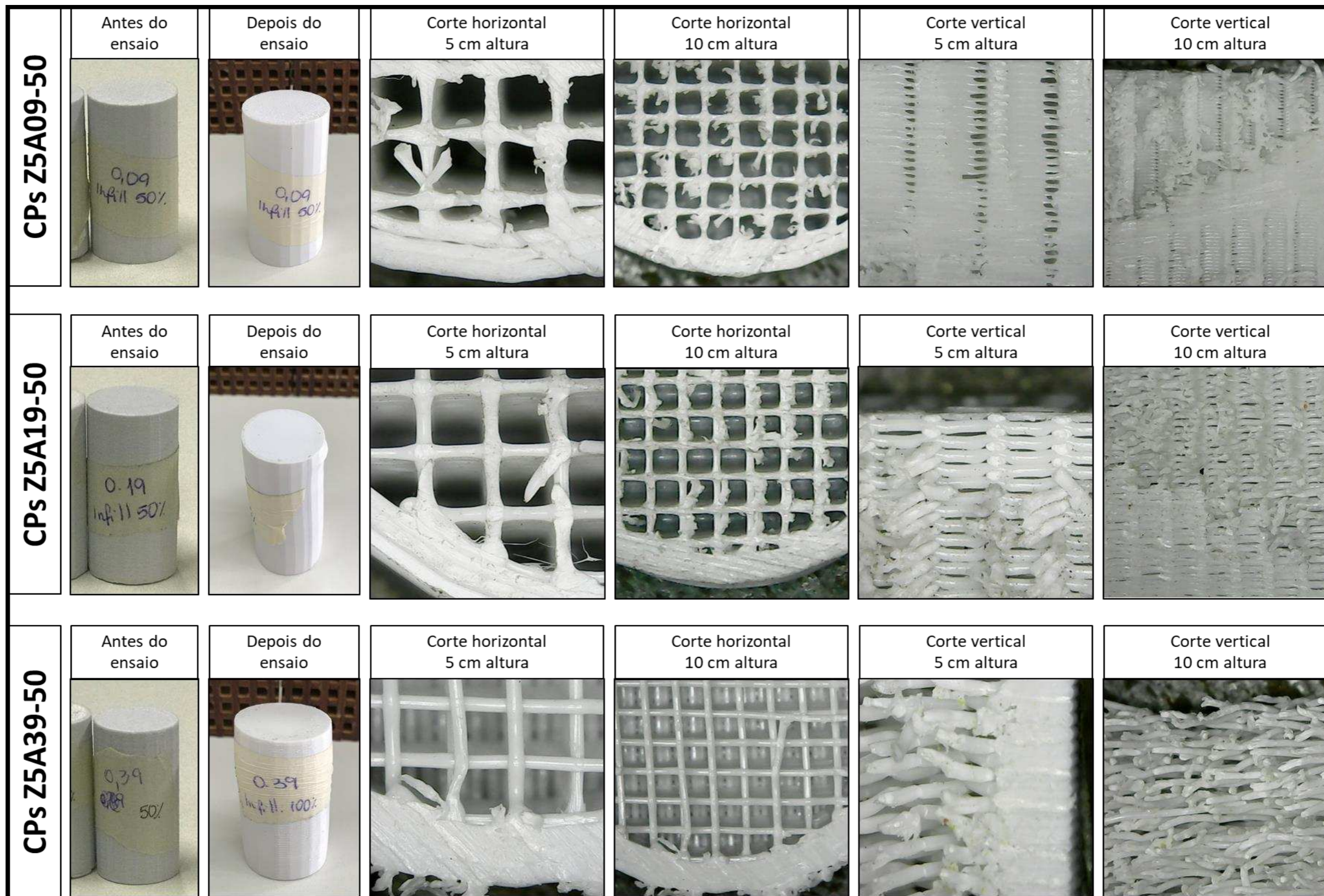
(b) CPs Z10A09-100



Fonte: Autor, 2019.

Em razão das imagens anteriores não apresentarem um grau de detalhamento buscado na pesquisa, foi imprescindível realizar as análises dos outros CPs de modo a garantir a boa visualização dos mesmos. Por esta razão foi montado o Quadro 17, que expõe os CPs que apresentaram visualmente mais detalhes nas fotos.

Quadro 17: Comparativo das fotos no microscópio



Fonte: Autor, 2019.

O quadro anterior expõe três modelos de CPs, os quais são possíveis visualizar diferenças mais notáveis entre eles. Nas imagens os “cortes horizontais”, representam o tipo de corte no CP, já o “5 cm altura” é a distância entre ele e a câmera do microscópio. A primeira característica destacada é a união entre as fibras, que pode ser visualizada no corte horizontal de 5 e 10 cm, observa-se que comparado aos outros modelos o Z5A09-50 possui as fibras mais unidas e completamente fundidas entre elas (horizontalmente e verticalmente), a medida que a espessura da linha aumenta (0,09 para 0,19 para 0,39 mm) ela se torna menos próxima e menos fundida. Promovendo uma resistência reduzida entre as fibras e consequentemente a queda da resistência mecânica do CP.

Outra característica que pode ser observada no corte vertical de 5 e 10 cm, é a distância entre as camadas, quanto mais espessa a linha de impressão, mais distante ela se encontra uma da outra, formando vãos maiores, deixando as fibras mais propensas a se deslocarem quando comprimidas. Foi possível verificar também um pequeno esgarçamento interno das fibras, apenas para os modelos que se romperam e para aqueles que apresentaram maior variação vertical, os outros aparentemente permaneceram intactos.

Como última característica de destaque, é possível observar nas fotos realizadas a 2,5 cm de distância entre a câmera e o CP, que há a presença de poros no modelo. A figura 31 apresenta o modelo que obteve o maior preenchimento.

Figura 31: Foto do modelo Z10A09-100 a 2,5 cm de distância do microscópio



Fonte: Autor, 2019.

Por fim, na imagem anterior cada pequeno ponto preto representa um poro. Como alternativa para pesquisas futuras, sugere-se a utilização de um microscópio com maior capacidade de aproximação (zoom) para facilitar a visualização.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Essa dissertação teve como princípio a avaliação do comportamento mecânico de polímeros para impressão 3D. O ABS foi o material escolhido para ser usado nos corpos de prova, para que pudessem ser estudados e ensaiados seus comportamentos mecânicos visando a otimização estrutural.

Partindo de uma base de informações e métodos desenvolvidos em uma pesquisa realizada anteriormente, por um grupo de pesquisadores da UFV (MARTINEZ et al., 2017), essa dissertação analisou e comparou os modelos impressos em duas impressoras: Cubex e Zortrax. Como complemento teórico, foram compiladas, através do capítulo de revisão de literatura, diversas informações a respeito da MA de maneira a ampliar os horizontes e a complementar as próximas etapas da pesquisa.

A aplicação dos CPs em ensaios mecânicos, a utilização da ferramenta digital (simulação), foi a alternativa escolhida para ser desenvolvida nesta dissertação, um caminho que se mostrou eficaz e que pôde proporcionar melhorias no sistema e no produto como um todo. Após estudar o comportamento mecânico dos corpos de prova, foi observado a necessidade de se aplicar análises mais profundas, com a utilização de um microscópio para uma investigação mais completa.

Após realização de toda a pesquisa, foi concluído que os CPs de polímero ABS possuem resistência mecânica compatível para sua utilização e é possível de ser aplicado futuramente dentro do processo construtivo na AEC. Como resultado preliminar pode-se dizer que os modelos sólidos apresentam resistência superior aos modelos de malha, no entanto, a relação material versus o tempo de impressão revela que os modelos de malha proporcionam grande economia.

Foi verificado que, com o aumento das dimensões, os CPs maiores obtiveram melhores resultados quanto à sua resistência, tendo em vista os ensaios reais e as simulações. É possível também, prever um melhoramento físico e mecânico nos CPs a partir da sua alteração geométrica e dimensional. A troca e/ou mesclagem de materiais na impressão pode promover um ganho exponencial nas características mecânicas dos CPs.

Considera-se que os caminhos escolhidos para a realização do trabalho, em termos metodológicos, mantiveram o indispensável alinhamento com os objetivos, o que permitiu a adequada condução dos trabalhos de campo/laboratórios. Quanto às opções técnicas escolhidas para a condução da pesquisa, buscou-se estruturá-las de modo que o retorno da pesquisa fosse não apenas as diretrizes finais, mas a própria metodologia que tem potencial para ser incorporada por novas pesquisas.

Este trabalho foi exclusivo para utilização do ABS, mas destaca-se para trabalhos futuros, a ampliação para polímeros do tipo PLA, que é obtido a partir de recursos renováveis e novos ensaios como a flexão de três pontos. A alteração da geometria para prisma quadrangular, possivelmente, apresentaria resultados eficientes, e os CPs poderiam ser ensaiados na vertical e na horizontal (podem ser comparados com pilares e vigas). Quanto ao preenchimento, a forma mais econômica de impressão é o modelo 50% devido ao fator massa versus resistência. As linhas de impressão devem ser mais finas possíveis para que haja uma melhor adesão entre elas.

Por fim, em relação à geometria interna, ao aumentar o entrelaçamento entre as fibras através da redução da angulação de 90 para 33 graus, formando, por exemplo, triângulos, as camadas poderiam ser aplicadas como treliças e, possivelmente, os CPs seriam mais resistentes. Essas sugestões de melhorias vieram através do arrolamento de informações e dos resultados obtidos no decorrer da pesquisa.

Em relação aos maiores desafios e limitações da pesquisa, pode-se destacar a criação de objetos em escala real para que os resultados obtidos pudessem ser aplicados, já que o intuito de desenvolver a MA para a AEC é uma tarefa complexa.

Quanto aos resultados da dissertação tem-se que os novos modelos de CPs impressos pela Zortrax mostraram-se eficientes, com melhor resistência, utilizando menos material e apresentando melhor qualidade de impressão. No entanto, a Cubex possui um tempo de impressão menor.

Foi comprovado que, no caso dos CPs menores, os modelos maciços e de malha apresentaram diferenças de mais de 50% em seu desempenho mecânico. Nos modelos maiores essa diferença cai para valores próximos a 20%.

A simulação mostrou ser uma importante ferramenta em análises estruturais, tendo em vista que seus resultados foram bem próximos aos valores reais. Ela também fornece dados para taxa de deslocamento vertical e horizontal dos CPs, taxa esta que serve para analisar o comportamento do modelo após a aplicação da carga. A análise do Von Mises Stress (VMS), que baliza a distorção e aponta o local de ruptura, serve como parâmetro para outros ensaios. Por último, foi realizada uma análise das forças aplicadas (Principal Stress) nos CPs em que, através da comparação das médias, pode-se obter um valor que determina a aplicação máxima de carga no determinado CP ensaiado. Entretanto, é necessário que haja mais estudos a respeito da implantação de dados no software para que os resultados possam ser mais coesos.

A análise microscópica revelou detalhes pertinentes à resistência dos CPs através do comportamento de suas fibras internas. Por meio das fotos foi possível confirmar que quanto mais fina a camada de impressão mais unidas/fundidas elas ficam; resultando em maior resistência mecânica. Para os modelos de 50%, tem-se como melhor exemplo o Z5A09-50 e para os modelos sólidos de 100% há o Z10A09-100 o qual apresenta uma menor quantidade de poros que resulta também na melhoria mecânica e na força de ligação entre as camadas. Sendo assim, a análise microscópica pode ser utilizada como ferramenta para futuras pesquisas e aperfeiçoamento dos modelos.

Para estudos futuros, são necessidades e oportunidades:

- a) Produzir um número maior de CPs para criação de parâmetros mais detalhados e que possam ampliar o nível de profundidade das comparações.
- b) Aprimorar o lançamento de dados no software de simulação.
- c) Analisar mais profundamente a geometria da malha interna dos CPs para melhoraria da resistência mecânica.
- d) Pesquisar técnicas para redução do consumo de material sem que haja perda de resistência.
- e) Utilizar um microscópio com maior capacidade de aproximação (zoom), melhorando a qualidade da imagem e aprofundando informações acerca das propriedades internas do CP.

BIBLIOGRAFIA

ARIFFIN, N. A.; HASLIZAM, N. N.; SAMSURRIJAL, S. A.; SELIMIN, M. A.; MANAP, N.; CHUAN, L. T.; ABDULLAH, H. Z.; IDRIS, M. I. A Comparative Study of Physical and Mechanical Properties of Wood Plastic Composite Produced from Different Agriculture Residues. **Proceedings of The International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Bandung**, Indonesia, March 6-8, 2018.

ASKELAND, D. R.; PHULE, P. P. **The science and engineering of materials**. Pacific Grove/Ca: Brooks/Cole, 2003.

BRESEGHELLO, L. A PERFORMATIVE APPROACH TO 3D PRINTED ARCHITECTURE. **Bachelor Thesis**. Politecnico di Milano, Facoltà di Architettura e Società. Bachelor in Science of Architecture. Supervisor: Prof. Ingrid Paoletti. Co-supervisor: Roberto Naboni... 2015.

BLOK, L. G.; LONGANA, M. L.; YU, H.; WOODS, B. K. An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites. **Additive Manufacturing**, v. 22, p. 176-186, 2018.

BRISCHETTO, S.; FERRO, C.G.; TORRE, R.; MAGGIORE, P. 3D FDM production and mechanical behavior of polymeric sandwich specimens embedding classical and honeycomb cores. **Curved and Layer Structure**. Berlin: De Gruyter, 2018, p.80-94.

CARAUSU, C.; MAZURCHEVICI A.; CIOFU C.; MAZURCHEVICI S. The 3D printing modelling of biodegradable material. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2018. p. 042008.

CARVALHO, J. A. N. Cerâmica 3D: Sistemas Digitais Para a Personalização do Desenho e Fabrico de Componentes Arquitetónicos. **Tese de Doutorado**. 2018.

CASELLA, G.; BERGER, R. L. Inferência estatística. **São Paulo: Cengage Learning**, 2010.

CROLLA, K.; WILLIAMS, N.; MUEHLBAUER, M.; BURRY, J. Smart Nodes Pavilion. Towards Custom-optimized Nodes Applications in Construction. In: (CAADRIA), 22, 2017, Hong Kong. **Proceedings...** Hong Kong: CAADRIA, 2017. p. 467-477. ISBN 9789881902689.

DE WOLF, C. C. E. L. Low Carbon Pathways for Structural Design. In: **Proceedings of IASS Annual Symposia**. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), 2018. p. 1-4.

DIVYATHEJ, M. V.; VARUN, M.; RAJEEV, P. Analysis of mechanical behavior of 3D printed ABS parts by experiments. In: **INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC & ENGINEERING RESEARCH**, Volume 7, Issue 3, March-2016. ISSN 2229-5518.

DIZON, J. R. C.; ESPERA JR, A. H.; CHEN, Q.; ADVINCULA, R. C. Mechanical characterization of 3D-printed polymers. **Additive Manufacturing**, v. 20, p. 44-67, 2018.

EPA - Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos. Disponível em: <https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_Report.cfm?Lab=NCER&dirEntryID=249238>. Acesso em: 22/02/2019.

ESMAEILI, F.; EBADI, H. Handy Microscopic Close-Range Videogrammetry. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 42, n. 4/W4, 2017.

FREYTAG, M.; SHAPIRO, V.; TSUKANOV, I. Finite element analysis in situ. **Finite Elements in Analysis and Design**, v. 47, n. 9, p. 957-972, 2011.

GARG, S.; PANT, M. Meshfree methods: a comprehensive review of applications. **International Journal of Computational Methods**, v. 15, n. 04, p. 1830001, 2018.

GLADMAN, A.S.; MATSUMOTO, E.A.; NUZZO, R.G.; MAHADEVAN, L.; LEWIS, J.A. "Biomimetic 4D printing". **Nature Materials**. v. 15, n. 4, p. 413, 2016.

GNANASEKARAN, K.; HEIJMANS, T.; VAN BENNEKOM, S.; WOLDHUIS, H. 3D printing of CNT-and graphene-based conductive polymer nanocomposites by fused deposition modeling. **Applied materials today**, v. 9, p. 21-28, 2017.

HAEUSLER, M. H.; MUEHLBAUER, M.; BOHNENBERGER, S.; BURRY, J. Furniture design using custom-optimised structural nodes. In: **22nd International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia.**, 2017. p. 841-851.

IBN-MOHAMMED, T.; GREENOUGH, R.; TAYLOR, S.; OZAWA-MEIDA, L.; ACQUAYE, A. Operational vs. embodied emissions in buildings - A review of current trends. **Energy and Buildings**, v. 66, p. 232-245, 2013.

IDC - International Data Corporation. Disponível em:
<<https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS43487718>>.
Acesso em: 29 ago 2019.

JOHNSON, M. D.; COLLINS, P. K. Scaled Physical Prototyping of Construction Processes Using 3D Printing. **KnE Engineering**, v. 2, n. 2, p. 249-257, 2017.

KODAMA, H. Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer. **Review of scientific instruments**, v. 52, n. 11, p. 1770-1773, 1981.

MARTINEZ, A. C. P.; PEDROTI, L. G.; DE SOUZA, D. L.; DOS SANTOS, D. M.; MARTINS, M. A. D. Simulação de desempenho estrutural baseada na prototipagem rápida com impressão 3d. **Blucher Design Proceedings**, v. 3, n. 12, p. 333-339, 2017.

MASERA, G.; MUSCOGIURI, M.; BONGIOVANNI, A.; COLOMBO, M. Towards a new digital craft. Potential and limitations of 3D printing in architecture and construction. In: **ISTeA 2017-Re-shaping the construction industry**. Maggioli Editore, 2017. p. 83-92.

MEYER, J.; DUCHANOIS, G.; BIGNON, J-C; BOUALI, A. Computer design and digital manufacturing of folded architectural structures composed of wood panels testing and validation of the proposed digital approach. In: **International Conference of The Association for Computer-Aided Architectural Design Research In Asia**, 2015.

NABONI, R.; KUNIC, A. Design and Additive Manufacturing of Lattice-based Cellular Solids at Building Scale. In: **Proceedings of Sigradi 2017, XXI Congress of the Ibero-American Society of Digital Graphics**. 2017.

NABONI, R.; PAOLETTI, I. **Advanced customization in architectural design and construction**. Springer International Publishing, 2015.

NING, F.; CONG, W.; QIU, J.; WEI, J.; WANG, S. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. **Composites Part B: Engineering**, 80, 369-378. 2015.

OXMAN, R.; OXMAN, R. New structuralism: design, engineering and architectural technologies. **Architectural Design**, v. 80, n. 4, p. 14-23, 2010.

PANDA, B.; TAN, M. J.; GIBSON, I.; CHUA, C. K. The Disruptive Evolution Of 3D Printing. Proc. of the 2nd Intl. Conf. on Progress in Additive Manufacturing. Pro-AM. Organizers. Published by **Research Publishing**, Singapore ISSN: 2424-8967, 2016.

PARITALA, P. K.; MANCHIKATLA, S.; YARLAGADDA, P. Digital Manufacturing-Applications Past, Current, and Future Trends. **Procedia Engineering**, v. 174, p. 982-991, 2017.

RELATÓRIO TÉCNICO E APRESENTAÇÃO DA SÉRIE 23 EMIC - "MADE IN BRAZIL". Disponível em: <<https://www.instron.com.br/-/media/literature-library/products/2018/01/2300-series-brazil-brochure.pdf?la=pt-BR>>.

Acesso em: 17 maio 2019.

RIPPMANN, M.; LIEW, A.; VAN MELE, T.; BLOCK, P. Design, fabrication and testing of discrete 3D sand-printed floor prototypes. **Materials Today Communications**, v. 15, p. 254-259, 2018.

SHOFNER, M. L.; LOZANO, K.; RODRÍGUEZ-MACÍAS, F. J.; BARRERA, E. V. Nanofiber-reinforced polymers prepared by fused deposition modeling. **Journal of applied polymer science**, 89(11), 3081-3090. (2003).

TAY, Y. W. D.; PANDA, B.; PAUL, S. C.; NOOR MOHAMED, N. A.; TAN, M. J.; LEONG, K. F. 3D printing trends in building and construction industry: a review. **Virtual and Physical Prototyping**, v. 12, n. 3, p. 261-276, 2017.

TEKINALP, H. L.; KUNC, V.; VELEZ-GARCIA, G. M.; DUTY, C. E.; LOVE, L. J.; NASKAR, A. K.; OZCAN, S. Highly oriented carbon fiber–polymer composites via additive manufacturing. **Composites Science and Technology**, 105, 144-150. 2014.

WANG, X.; JIANG, M.; ZHOU, Z.; GOU, J.; HUI, D. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. **Composites Part B: Engineering**, v. 110, p. 442-458, 2017.

WANGLER, T.; LLORET, E.; REITER, L.; HACK, N.; GRAMAZIO, F.; KOHLER, M.; FLATT, R. Digital concrete: opportunities and challenges. **RILEM Technical Letters**, v. 1, p. 67-75, 2016.

WOJTYLA, Szymon; KLAMA, Piotr; BARAN, Tomasz. Is 3D printing safe? Analysis of the thermal treatment of thermoplastics: ABS, PLA, PET, and nylon. **Journal of occupational and environmental hygiene**, v. 14, n. 6, p. D80-D85, 2017.

WU, P.; WANG, J.; WANG, X. A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. **Automation in Construction**, v. 68, p. 21-31, 2016.

YANG, C.; TIAN, X.; LIU, T.; CAO, Y.; LI, D. 3D printing for continuous fiber reinforced thermoplastic composites: mechanism and performance. **Rapid Prototyping Journal**, v. 23, n. 1, p. 209-215, 2017.

YAVUZ, A. O.; SAĞIROĞLU, O. Reviewing the Bricks Used in The Traditional Architecture with The Shape Grammar Method. **Gazi University Journal of Science**, v. 29, n. 4, p. 741-749, 2016.

YUAN, P. F.; CHEN, Z.; ZHANG, L. Form finding for 3d printed pedestrian bridges. In: **Proceedings of the 23rd International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA)**. 2018.

ANEXO 4 - CPs Z5A-50% (ZORTRAX) - ABS

Scan&Solve™ Simulation Summary

Simulation run time: 00:00:12

terça-feira, 4 de fevereiro de 2020 16:57:01

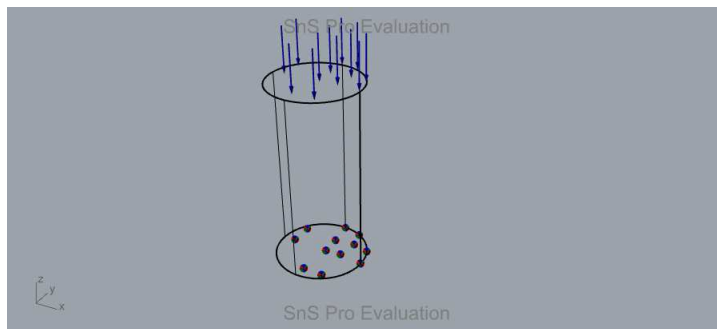
Material Summary

Property	Value
Description	ABS
Density	1.049e-09 Mg/mm ³
Elastic Modulus	2400 MPa
Default Failure Criterion	von Mises
Tensile Yield Strength	44.8 MPa

Component Geometry Summary

Quantity	Unit
Component	e8648a76-516f-4560-95d3-9af22b6d99c3
Material	ABS
Mass	2.57374e+07 Mg
Bounding Box	{-12.5605, -12.5398, 0}-{12.4395, 12.4602, 50}

Loads & Restraints



Load Summary

Description	Type	Definition
Load 0	Pressure	12.98 MPa

Restraint Summary

Description	Definition
Restraint 0	X-Fixed, Y-Fixed, Z-Fixed

Simulation Summary

Simulation run time: 00:00:12

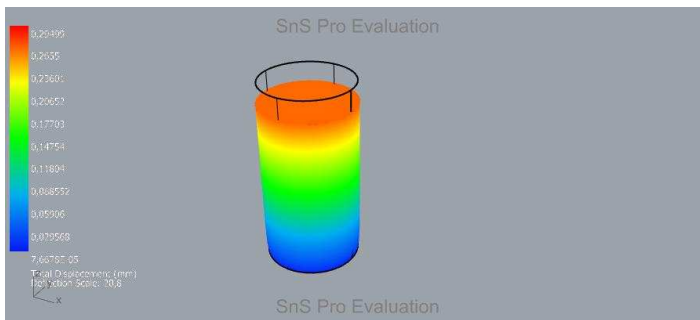
Settings

Basis Functions	
Degree	1
nx	20
ny	20
nz	37
Element size	{1.46973, 1.46973, 1.46973}
Resolution setting	10000
Computation Box	
min. corner	{-14.0204, -14.008, -1.46045}
max. corner	{13.9045, 13.9168, 51.4498}
Linear Solver	
Solver	Auto: DSS @ < 100000

Units

Quantity	Unit
Length	mm
Mass	Mg
Force	N
Time	s

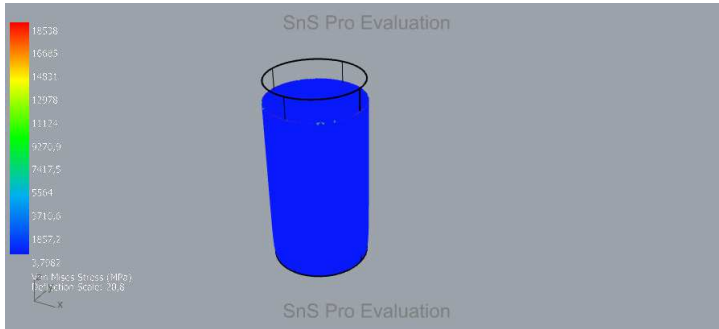
Simulation Results Displacements



Displacement Summary

	Amount	Location
Minimum	7,6678E-005 mm	-0,0605, -0,0398, 0,0000
Maximum	2,9499E-001 mm	-8,3392, 9,3258, 50,0000

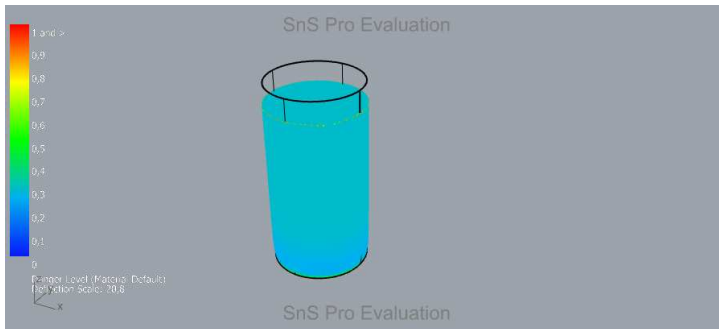
Von Mises Stress



Von Mises Stress Summary

	Amount	Location
Minimum	3,7982E+000 MPa	-0,0605, -0,0398, 0,0000
Maximum	1,8538E+004 MPa	-8,3392, 9,3258, 50,0000

Danger Level



Danger Level Summary

	Amount	Location
Minimum	8,4781E-002	-0,0605, -0,0398, 0,0000
Maximum	Criterion Limit Exceeded	-8,3392, 9,3258, 50,0000

Results Extrema

	Minimum	Maximum
X-Displacement	-2,7076E-002 mm	2,7889E-002 mm
Y-Displacement	-2,7040E-002 mm	2,7868E-002 mm
Z-Displacement	-2,9264E-001 mm	-5,5638E-005 mm
Total Displacement	7,6678E-005 mm	2,9499E-001 mm
Von Mises Stress	3,7982E+000 MPa	1,8538E+004 MPa
Max. Principal Stress	-1,8688E+004 MPa	8,4447E+003 MPa
Mid. Principal Stress	-1,9729E+004 MPa	4,4060E+003 MPa
Min. Principal Stress	-3,7724E+004 MPa	4,1302E+003 MPa

ANEXO 5 - CPs Z5A-50% (ZORTRAX) - ABS - STANDARD DEVIATION MODEL

Scan&Solve™ Simulation Summary

Simulation run time: 00:00:11

terça-feira, 4 de fevereiro de 2020 17:08:34

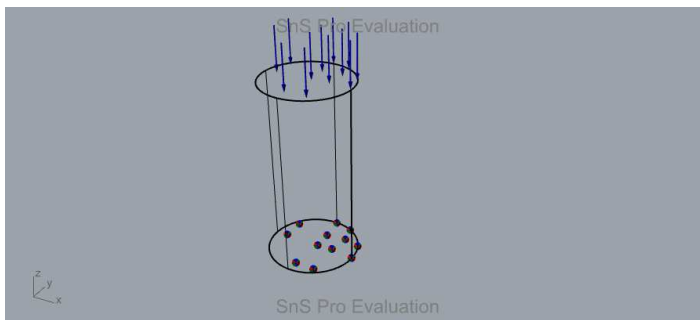
Material Summary

Property	Value
Description	ABS - STANDARD DEVIATION MODEL
Density	1.122e-09 Mg/mm ³
Elastic Modulus	1898 MPa
Default Failure Criterion	von Mises
Tensile Yield Strength	44.8 MPa

Component Geometry Summary

Quantity	Unit
Component	e8648a76-516f-4560-95d3-9af22b6d99c3
Material	ABS - STANDARD DEVIATION MODEL
Mass	2.75284e+07 Mg
Bounding Box	{-12.5605, -12.5398, 0}-{12.4395, 12.4602, 50}

Loads & Restraints



Load Summary

Description	Type	Definition
Load 0	Pressure	12.98 MPa

Restraint Summary

Description	Definition
Restraint 0	X-Fixed, Y-Fixed, Z-Fixed

Simulation Summary

Simulation run time: 00:00:11

Settings

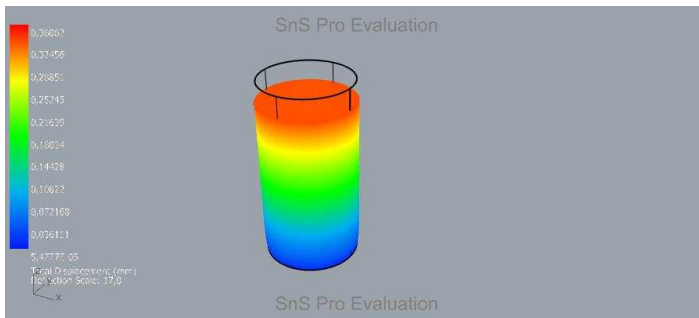
Basis Functions	
Degree	1
nx	20
ny	20
nz	37
Element size	{1.46973, 1.46973, 1.46973}
Resolution setting	10000
Computation Box	
min. corner	{-14.0204, -14.008, -1.46045}
max. corner	{13.9045, 13.9168, 51.4498}
Linear Solver	
Solver	Auto: DSS @ < 100000

Units

Quantity	Unit
Length	mm
Mass	Mg
Force	N
Time	s

Simulation Results

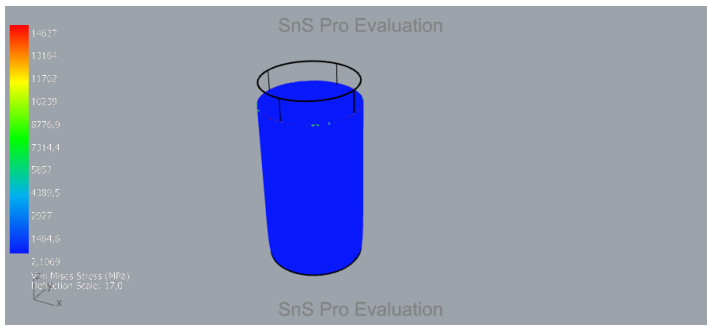
Displacements



Displacement Summary

	Amount	Location
Minimum	5,4777E-005 mm	-0,0605, -0,0398, 0,0000
Maximum	3,6062E-001 mm	-8,3392, 9,3258, 50,0000

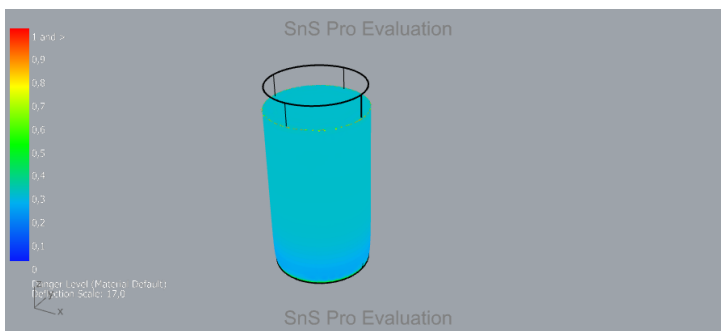
Von Mises Stress



Von Mises Stress Summary

	Amount	Location
Minimum	2,1069E+000 MPa	-0,0605, -0,0398, 0,0000
Maximum	1,4627E+004 MPa	-7,3435, 10,1194, 50,0000

Danger Level



Danger Level Summary

	Amount	Location
Minimum	4,7028E-002	-0,0605, -0,0398, 0,0000
Maximum	Criterion Limit Exceeded	-7,3435, 10,1194, 50,0000

Results Extrema

	Minimum	Maximum
X-Displacement	-4,3509E-002 mm	4,2510E-002 mm
Y-Displacement	-4,2353E-002 mm	4,2867E-002 mm
Z-Displacement	-3,5620E-001 mm	-1,7132E-005 mm
Total Displacement	5,4777E-005 mm	3,6062E-001 mm
Von Mises Stress	2,1069E+000 MPa	1,4627E+004 MPa
Max. Principal Stress	-2,6069E+004 MPa	8,7684E+003 MPa
Mid. Principal Stress	-2,7933E+004 MPa	5,6794E+003 MPa
Min. Principal Stress	-4,0909E+004 MPa	4,8247E+003 MPa

ANEXO 6 - CPs Z5A-50% (ZORTRAX) - ABS - ZORTRAX E ENSAIOS

Scan&Solve™ Simulation Summary

Simulation run time: 00:00:11

terça-feira, 4 de fevereiro de 2020 17:06:35

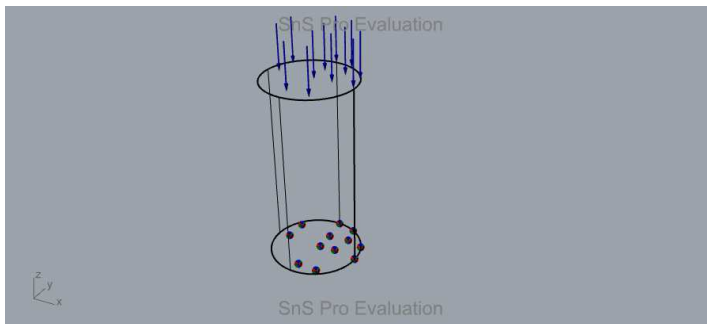
Material Summary

Property	Value
Description	ABS - ZORTRAX E ENSAIOS
Density	1.195e-09 Mg/mm ³
Elastic Modulus	1396 MPa
Default Failure Criterion	von Mises
Tensile Yield Strength	44.8 MPa

Component Geometry Summary

Quantity	Unit
Component	e8648a76-516f-4560-95d3-9af22b6d99c3
Material	ABS - ZORTRAX E ENSAIOS
Mass	2.93195e+07 Mg
Bounding Box	{-12.5605, -12.5398, 0}-{12.4395, 12.4602, 50}

Loads & Restraints



Load Summary

Description	Type	Definition
Load 0	Pressure	12.98 MPa

Restraint Summary

Description	Definition
Restraint 0	X-Fixed, Y-Fixed, Z-Fixed

Simulation Summary

Simulation run time: 00:00:11

Settings

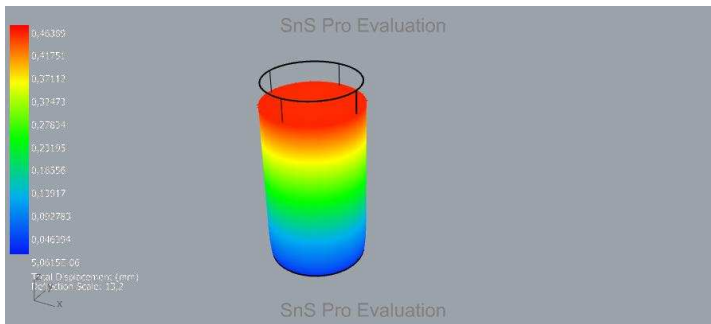
Basis Functions	
Degree	1
nx	20
ny	20
nz	37
Element size	{1.46973, 1.46973, 1.46973}
Resolution setting	10000
Computation Box	
min. corner	{-14.0204, -14.008, -1.46045}
max. corner	{13.9045, 13.9168, 51.4498}
Linear Solver	
Solver	Auto: DSS @ < 100000

Units

Quantity	Unit
Length	mm
Mass	Mg
Force	N
Time	s

Simulation Results

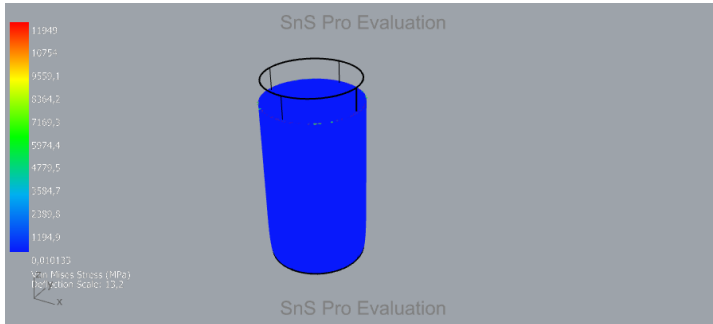
Displacements



Displacement Summary

	Amount	Location
Minimum	5,0615E-006 mm	-0,0605, -0,0398, 0,0000
Maximum	4,6389E-001 mm	9,3050, 8,2389, 50,0000

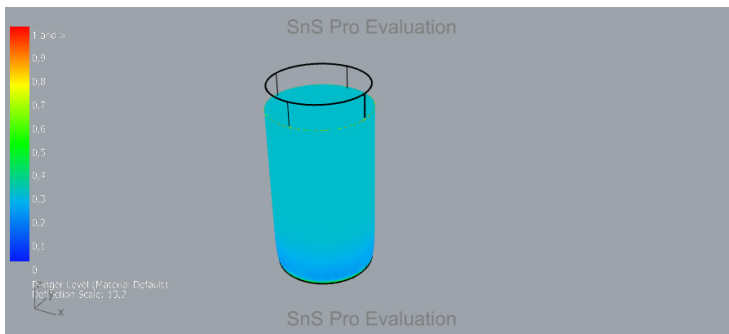
Von Mises Stress



Von Mises Stress Summary

	Amount	Location
Minimum	1,0133E-002 MPa	-0,0605, -0,0398, 0,0000
Maximum	1,1949E+004 MPa	-7,3435, 10,1194, 50,0000

Danger Level



Danger Level Summary

	Amount	Location
Minimum	2,2618E-004	-0,0605, -0,0398, 0,0000
Maximum	Criterion Limit Exceeded	-7,3435, 10,1194, 50,0000

Results Extrema

	Minimum	Maximum
X-Displacement	-6,6752E-002 mm	6,7075E-002 mm
Y-Displacement	-6,6302E-002 mm	6,7556E-002 mm
Z-Displacement	-4,5569E-001 mm	2,9842E-005 mm
Total Displacement	5,0615E-006 mm	4,6389E-001 mm
Von Mises Stress	1,0133E-002 MPa	1,1949E+004 MPa
Max. Principal Stress	-5,0980E+004 MPa	6,0785E+003 MPa
Mid. Principal Stress	-5,4598E+004 MPa	3,9237E+003 MPa
Min. Principal Stress	-6,1690E+004 MPa	2,0018E+003 MPa

ANEXO 7 - CPs Z5A-100% (ZORTRAX) - ABS

Scan&Solve™ Simulation Summary

Simulation run time: 00:00:11

terça-feira, 4 de fevereiro de 2020 17:16:17

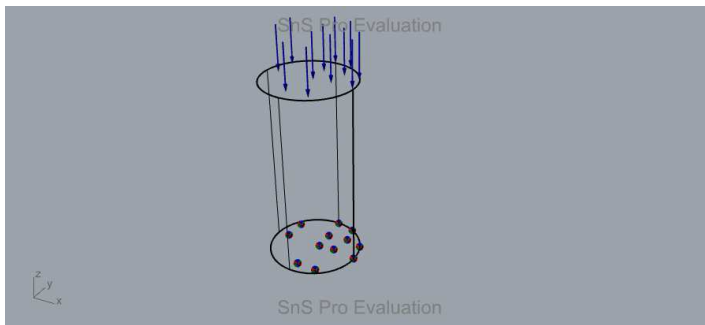
Material Summary

Property	Value
Description	ABS
Density	1.049e-09 Mg/mm ³
Elastic Modulus	2400 MPa
Default Failure Criterion	von Mises
Tensile Yield Strength	44.8 MPa

Component Geometry Summary

Quantity	Unit
Component	e8648a76-516f-4560-95d3-9af22b6d99c3
Material	ABS
Mass	2.57374e+07 Mg
Bounding Box	{-12.5605, -12.5398, 0}-{12.4395, 12.4602, 50}

Loads & Restraints



Load Summary

Description	Type	Definition
Load 0	Pressure	38.63 MPa

Restraint Summary

Description	Definition
Restraint 0	X-Fixed, Y-Fixed, Z-Fixed

Simulation Summary

Simulation run time: 00:00:11

Settings

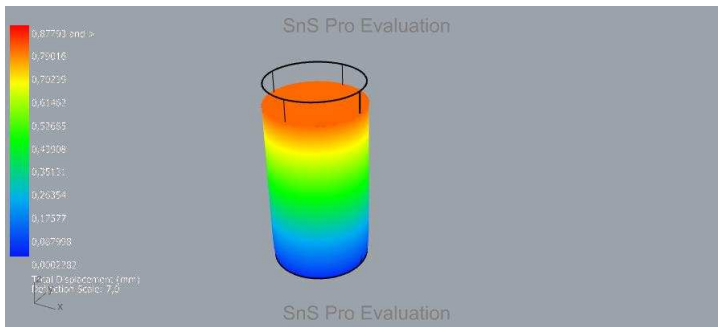
Basis Functions	
Degree	1
nx	20
ny	20
nz	37
Element size	{1.46973, 1.46973, 1.46973}
Resolution setting	10000
Computation Box	
min. corner	{-14.0204, -14.008, -1.46045}
max. corner	{13.9045, 13.9168, 51.4498}
Linear Solver	
Solver	Auto: DSS @ < 100000

Units

Quantity	Unit
Length	mm
Mass	Mg
Force	N
Time	s

Simulation Results

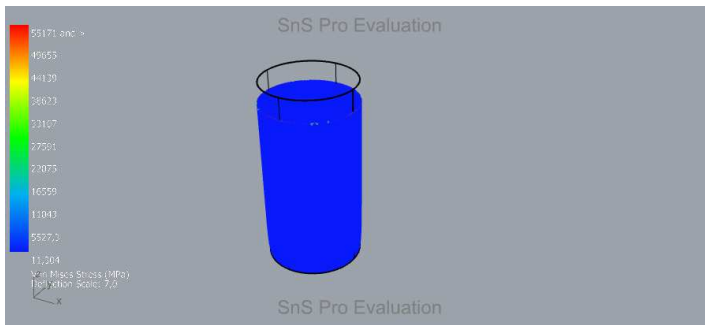
Displacements



Displacement Summary

	Amount	Location
Minimum	2,2820E-004 mm	-0,0605, -0,0398, 0,0000
Maximum	8,7793E-001 mm	-8,3392, 9,3258, 50,0000

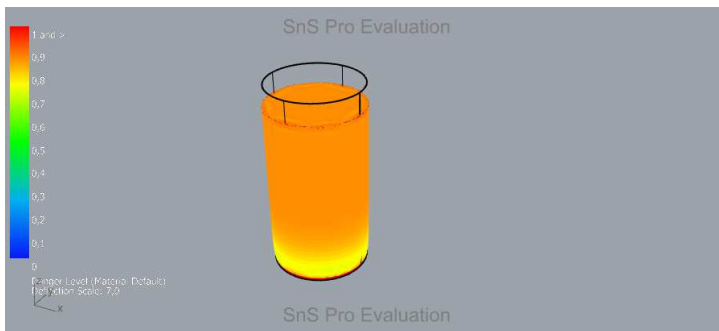
Von Mises Stress



Von Mises Stress Summary

	Amount	Location
Minimum	1,1304E+001 MPa	-0,0605, -0,0398, 0,0000
Maximum	5,5171E+004 MPa	-8,3392, 9,3258, 50,0000

Danger Level



Danger Level Summary

	Amount	Location
Minimum	2,5231E-001	-0,0605, -0,0398, 0,0000
Maximum	Criterion Limit Exceeded	-8,3392, 9,3258, 50,0000

Results Extrema

	Minimum	Maximum
X-Displacement	-8,0581E-002 mm	8,3000E-002 mm
Y-Displacement	-8,0474E-002 mm	8,2938E-002 mm
Z-Displacement	-8,7091E-001 mm	-1,6558E-004 mm
Total Displacement	2,2820E-004 mm	8,7793E-001 mm
Von Mises Stress	1,1304E+001 MPa	5,5171E+004 MPa
Max. Principal Stress	-5,5617E+004 MPa	2,5132E+004 MPa
Mid. Principal Stress	-5,8716E+004 MPa	1,3113E+004 MPa
Min. Principal Stress	-1,1227E+005 MPa	1,2292E+004 MPa

ANEXO 8 - CPs Z5A-100% (ZORTRAX) - ABS - STANDARD DEVIATION MODEL

Scan&Solve™ Simulation Summary

Simulation run time: 00:00:11

terça-feira, 4 de fevereiro de 2020 17:13:32

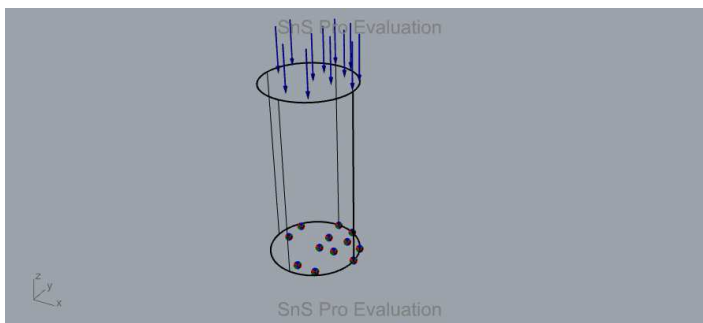
Material Summary

Property	Value
Description	ABS - STANDARD DEVIATION MODEL
Density	1.122e-09 Mg/mm ³
Elastic Modulus	1898 MPa
Default Failure Criterion	von Mises
Tensile Yield Strength	44.8 MPa

Component Geometry Summary

Quantity	Unit
Component	e8648a76-516f-4560-95d3-9af22b6d99c3
Material	ABS - STANDARD DEVIATION MODEL
Mass	2.75284e+07 Mg
Bounding Box	{-12.5605, -12.5398, 0}-{12.4395, 12.4602, 50}

Loads & Restraints



Load Summary

Description	Type	Definition
Load 0	Pressure	38.63 MPa

Restraint Summary

Description	Definition
Restraint 0	X-Fixed, Y-Fixed, Z-Fixed

Simulation Summary

Simulation run time: 00:00:11

Settings

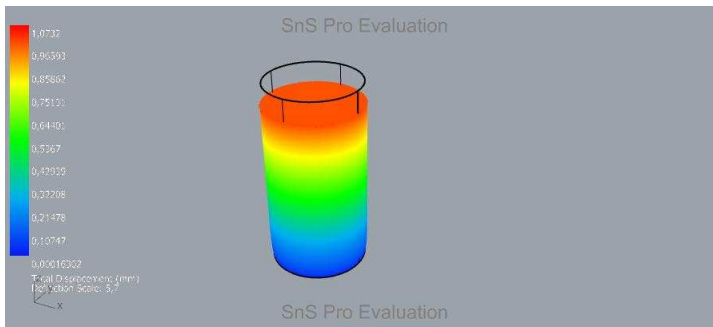
Basis Functions	
Degree	1
nx	20
ny	20
nz	37
Element size	{1.46973, 1.46973, 1.46973}
Resolution setting	10000
Computation Box	
min. corner	{-14.0204, -14.008, -1.46045}
max. corner	{13.9045, 13.9168, 51.4498}
Linear Solver	
Solver	Auto: DSS @ < 100000

Units

Quantity	Unit
Length	mm
Mass	Mg
Force	N
Time	s

Simulation Results

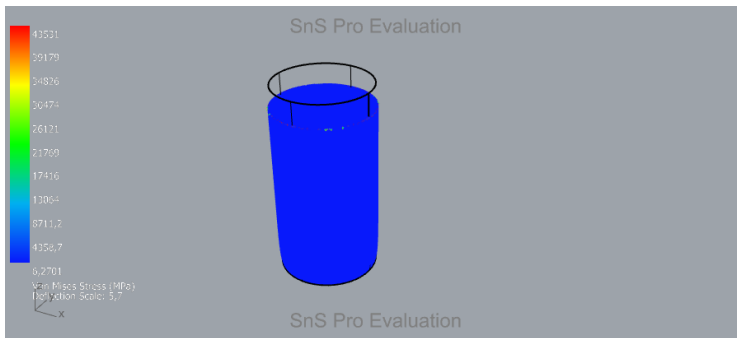
Displacements



Displacement Summary

	Amount	Location
Minimum	1,6302E-004 mm	-0,0605, -0,0398, 0,0000
Maximum	1,0732E+000 mm	-8,3392, 9,3258, 50,0000

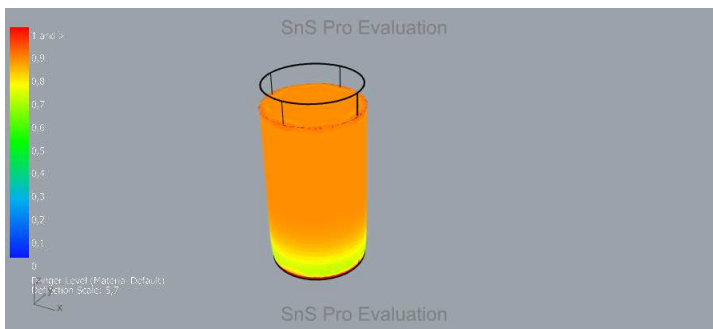
Von Mises Stress



Von Mises Stress Summary

	Amount	Location
Minimum	6,2701E+000 MPa	-0,0605, -0,0398, 0,0000
Maximum	4,3531E+004 MPa	-7,3435, 10,1194, 50,0000

Danger Level



Danger Level Summary

	Amount	Location
Minimum	1,3996E-001	-0,0605, -0,0398, 0,0000
Maximum	Criterion Limit Exceeded	-7,3435, 10,1194, 50,0000

Results Extrema

	Minimum	Maximum
X-Displacement	-1,2949E-001 mm	1,2652E-001 mm
Y-Displacement	-1,2605E-001 mm	1,2758E-001 mm
Z-Displacement	-1,0601E+000 mm	-5,0984E-005 mm
Total Displacement	1,6302E-004 mm	1,0732E+000 mm
Von Mises Stress	6,2701E+000 MPa	4,3531E+004 MPa
Max. Principal Stress	-7,7586E+004 MPa	2,6096E+004 MPa
Mid. Principal Stress	-8,3131E+004 MPa	1,6903E+004 MPa
Min. Principal Stress	-1,2175E+005 MPa	1,4359E+004 MPa

ANEXO 9 - CPs Z5A-100% (ZORTRAX) - ABS - ZORTRAX E ENSAIOS

Scan&Solve™ Simulation Summary

Simulation run time: 00:00:11

terça-feira, 4 de fevereiro de 2020 17:14:29

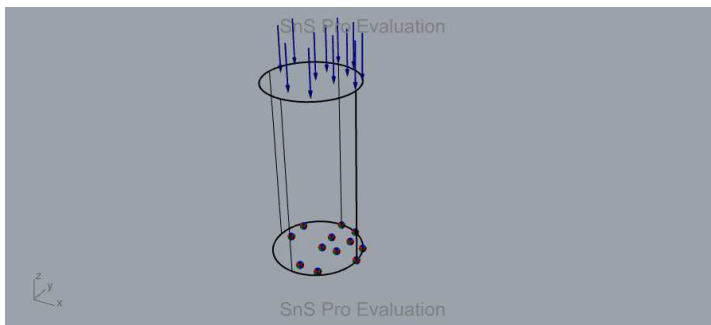
Material Summary

Property	Value
Description	ABS - ZORTRAX E ENSAIOS
Density	1.195e-09 Mg/mm ³
Elastic Modulus	1396 MPa
Default Failure Criterion	von Mises
Tensile Yield Strength	44.8 MPa

Component Geometry Summary

Quantity	Unit
Component	e8648a76-516f-4560-95d3-9af22b6d99c3
Material	ABS - ZORTRAX E ENSAIOS
Mass	2.93195e+07 Mg
Bounding Box	{-12.5605, -12.5398, 0}-{12.4395, 12.4602, 50}

Loads & Restraints



Load Summary

Description	Type	Definition
Load 0	Pressure	38.63 MPa

Restraint Summary

Description	Definition
Restraint 0	X-Fixed, Y-Fixed, Z-Fixed

Simulation Summary

Simulation run time: 00:00:11

Settings

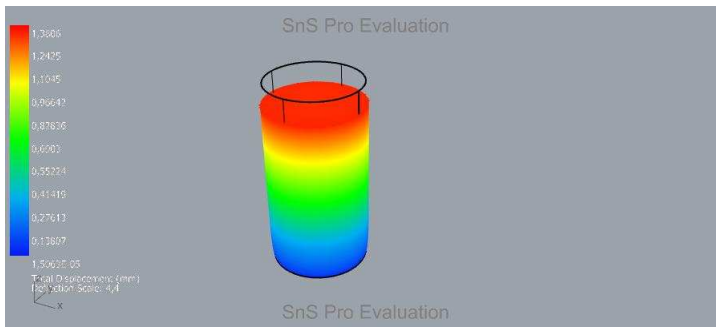
Basis Functions	
Degree	1
nx	20
ny	20
nz	37
Element size	{1.46973, 1.46973, 1.46973}
Resolution setting	10000
Computation Box	
min. corner	{-14.0204, -14.008, -1.46045}
max. corner	{13.9045, 13.9168, 51.4498}
Linear Solver	
Solver	Auto: DSS @ < 100000

Units

Quantity	Unit
Length	mm
Mass	Mg
Force	N
Time	s

Simulation Results

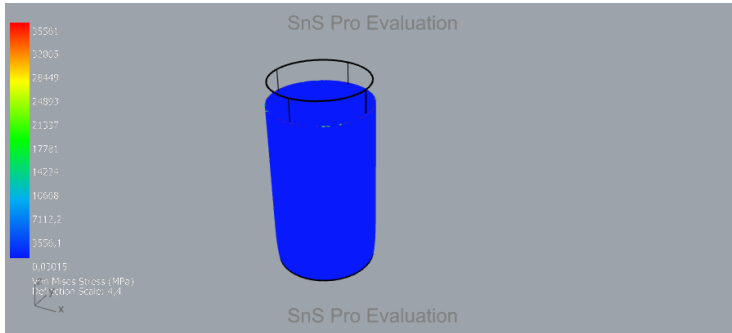
Displacements



Displacement Summary

	Amount	Location
Minimum	1,5063E-005 mm	-0,0605, -0,0398, 0,0000
Maximum	1,3806E+000 mm	9,3050, 8,2389, 50,0000

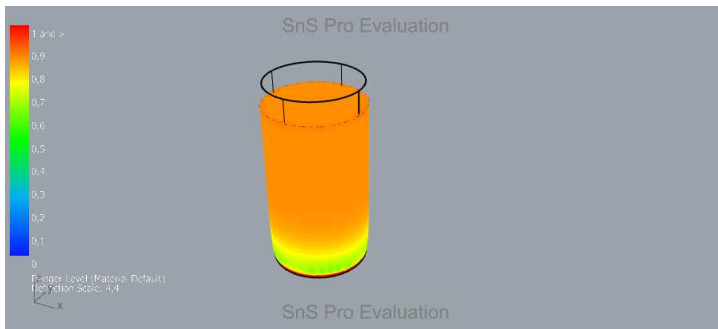
Von Mises Stress



Von Mises Stress Summary

	Amount	Location
Minimum	3,0150E-002 MPa	-0,0605, -0,0398, 0,0000
Maximum	3,5561E+004 MPa	-7,3435, 10,1194, 50,0000

Danger Level



Danger Level Summary

	Amount	Location
Minimum	6,7299E-004	-0,0605, -0,0398, 0,0000
Maximum	Criterion Limit Exceeded	-7,3435, 10,1194, 50,0000

Results Extrema

	Minimum	Maximum
X-Displacement	-1,9866E-001 mm	1,9962E-001 mm
Y-Displacement	-1,9732E-001 mm	2,0106E-001 mm
Z-Displacement	-1,3562E+000 mm	8,8810E-005 mm
Total Displacement	1,5063E-005 mm	1,3806E+000 mm
Von Mises Stress	3,0150E-002 MPa	3,5561E+004 MPa
Max. Principal Stress	-1,5172E+005 MPa	1,8090E+004 MPa
Mid. Principal Stress	-1,6249E+005 MPa	1,1677E+004 MPa
Min. Principal Stress	-1,8360E+005 MPa	5,9576E+003 MPa

ANEXO 10 - CPs Z10A-50% (ZORTRAX) - ABS

Scan&Solve™ Simulation Summary

Simulation run time: 00:00:11

terça-feira, 4 de fevereiro de 2020 17:41:32

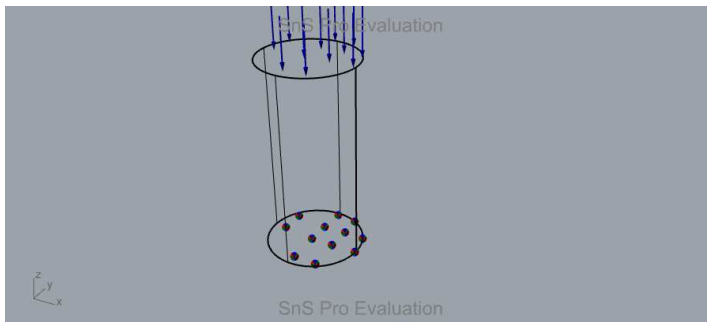
Material Summary

Property	Value
Description	ABS
Density	1.049e-09 Mg/mm ³
Elastic Modulus	2400 MPa
Default Failure Criterion	von Mises
Tensile Yield Strength	44.8 MPa

Component Geometry Summary

Quantity	Unit
Component	e1d11bb1-7baf-4122-acfa-1a5bdf10c17a
Material	ABS
Mass	2.05899e+08 Mg
Bounding Box	{-24.8068, -24.0992, 0}-{25.1932, 25.9008, 100}

Loads & Restraints



Load Summary

Description	Type	Definition
Load 4	Pressure	43.3 MPa

Restraint Summary

Description	Definition
Restraint 4	X-Fixed, Y-Fixed, Z-Fixed

Simulation Summary

Simulation run time: 00:00:11

Settings

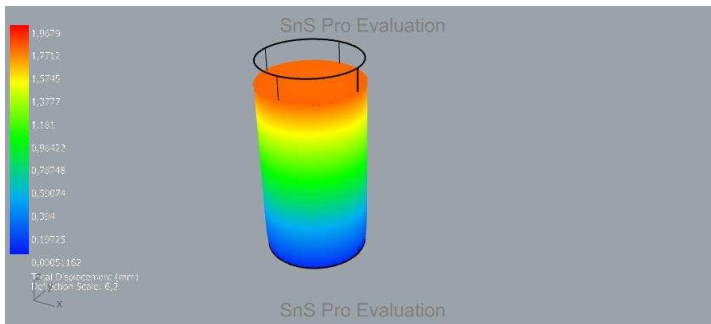
Basis Functions	
Degree	1
nx	20
ny	20
nz	37
Element size	{2.93947, 2.93947, 2.93947}
Resolution setting	10000
Computation Box	
min. corner	{-27.7267, -27.0359, -2.92119}
max. corner	{28.1233, 28.8141, 102.9}
Linear Solver	
Solver	Auto: DSS @ < 100000

Units

Quantity	Unit
Length	mm
Mass	Mg
Force	N
Time	s

Simulation Results

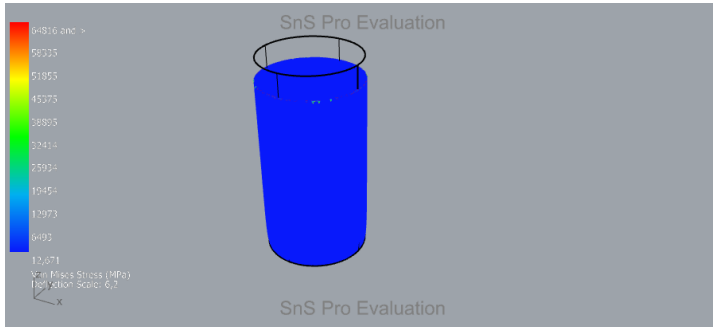
Displacements



Displacement Summary

	Amount	Location
Minimum	5,1162E-004 mm	0,1932, 0,9008, 0,0000
Maximum	1,9679E+000 mm	-16,3642, 19,6319, 100,0000

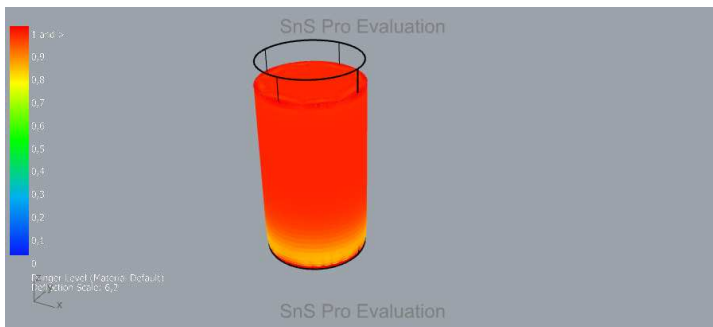
Von Mises Stress



Von Mises Stress Summary

	Amount	Location
Minimum	1,2671E+001 MPa	0,1932, 0,9008, 0,0000
Maximum	6,4816E+004 MPa	-16,3642, 19,6319, 100,0000

Danger Level



Danger Level Summary

	Amount	Location
Minimum	2,8284E-001	0,1932, 0,9008, 0,0000
Maximum	Criterion Limit Exceeded	-16,3642, 19,6319, 100,0000

Results Extrema

	Minimum	Maximum
X-Displacement	-1,8011E-001 mm	1,8557E-001 mm
Y-Displacement	-1,7996E-001 mm	1,8543E-001 mm
Z-Displacement	-1,9523E+000 mm	-3,7091E-004 mm
Total Displacement	5,1162E-004 mm	1,9679E+000 mm
Von Mises Stress	1,2671E+001 MPa	6,4816E+004 MPa
Max. Principal Stress	-6,5492E+004 MPa	2,9845E+004 MPa
Mid. Principal Stress	-6,9082E+004 MPa	1,5596E+004 MPa
Min. Principal Stress	-1,3203E+005 MPa	1,4671E+004 MPa

ANEXO 11 - CPs Z10A-50% (ZORTRAX) - ABS - STANDARD DEVIATION MODEL

Scan&Solve™ Simulation Summary

Simulation run time: 00:00:11

terça-feira, 4 de fevereiro de 2020 17:42:26

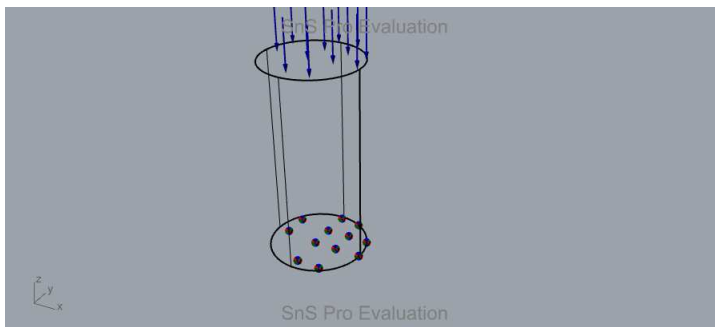
Material Summary

Property	Value
Description	ABS - STANDARD DEVIATION MODEL
Density	1.122e-09 Mg/mm ³
Elastic Modulus	1898 MPa
Default Failure Criterion	von Mises
Tensile Yield Strength	44.8 MPa

Component Geometry Summary

Quantity	Unit
Component	e1d11bb1-7baf-4122-acfa-1a5bdf10c17a
Material	ABS - STANDARD DEVIATION MODEL
Mass	2.20227e+08 Mg
Bounding Box	{-24.8068, -24.0992, 0}-{25.1932, 25.9008, 100}

Loads & Restraints



Load Summary

Description	Type	Definition
Load 4	Pressure	43.3 MPa

Restraint Summary

Description	Definition
Restraint 4	X-Fixed, Y-Fixed, Z-Fixed

Simulation Summary

Simulation run time: 00:00:11

Settings

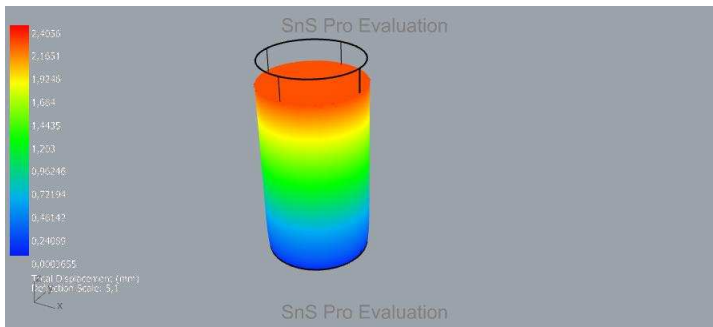
Basis Functions	
Degree	1
nx	20
ny	20
nz	37
Element size	{2.93947, 2.93947, 2.93947}
Resolution setting	10000
Computation Box	
min. corner	{-27.7267, -27.0359, -2.92119}
max. corner	{28.1233, 28.8141, 102.9}
Linear Solver	
Solver	Auto: DSS @ < 100000

Units

Quantity	Unit
Length	mm
Mass	Mg
Force	N
Time	s

Simulation Results

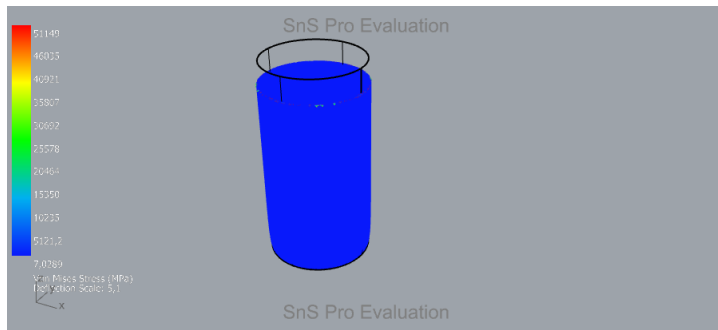
Displacements



Displacement Summary

	Amount	Location
Minimum	3,6550E-004 mm	0,1932, 0,9008, 0,0000
Maximum	2,4056E+000 mm	-16,3642, 19,6319, 100,0000

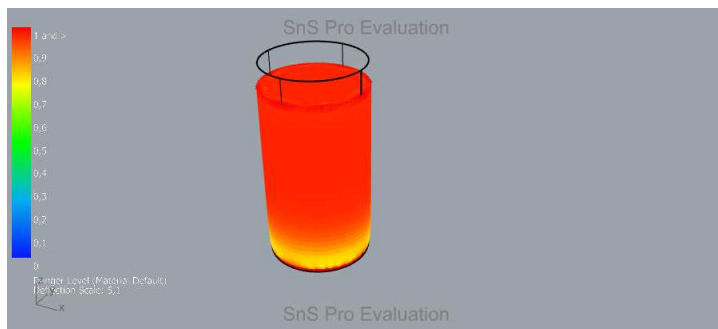
Von Mises Stress



Von Mises Stress Summary

	Amount	Location
Minimum	7,0289E+000 MPa	0,1932, 0,9008, 0,0000
Maximum	5,1149E+004 MPa	-14,3728, 21,2191, 100,0000

Danger Level



Danger Level Summary

	Amount	Location
Minimum	1,5690E-001	0,1932, 0,9008, 0,0000
Maximum	Criterion Limit Exceeded	-14,3728, 21,2191, 100,0000

Results Extrema

	Minimum	Maximum
X-Displacement	-2,8927E-001 mm	2,8280E-001 mm
Y-Displacement	-2,8161E-001 mm	2,8502E-001 mm
Z-Displacement	-2,3763E+000 mm	-1,1408E-004 mm
Total Displacement	3,6550E-004 mm	2,4056E+000 mm
Von Mises Stress	7,0289E+000 MPa	5,1149E+004 MPa
Max. Principal Stress	-9,1354E+004 MPa	3,0951E+004 MPa
Mid. Principal Stress	-9,7787E+004 MPa	2,0131E+004 MPa
Min. Principal Stress	-1,4311E+005 MPa	1,7233E+004 MPa

ANEXO 12 - CPs Z10A-50% (ZORTRAX) - ABS - ZORTRAX E ENSAIOS

Scan&Solve™ Simulation Summary

Simulation run time: 00:00:11

terça-feira, 4 de fevereiro de 2020 17:43:19

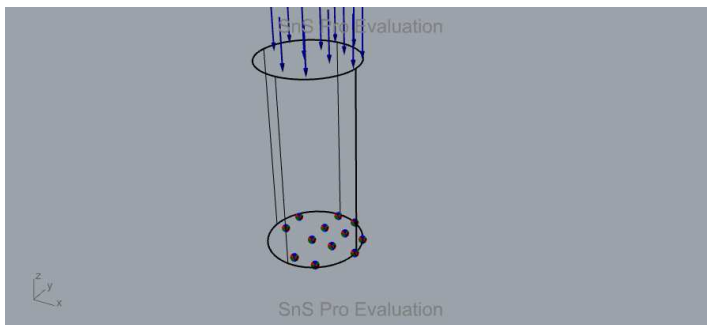
Material Summary

Property	Value
Description	ABS - ZORTRAX E ENSAIOS
Density	1.195e-09 Mg/mm ³
Elastic Modulus	1396 MPa
Default Failure Criterion	von Mises
Tensile Yield Strength	44.8 MPa

Component Geometry Summary

Quantity	Unit
Component	e1d11bb1-7baf-4122-acfa-1a5bdf10c17a
Material	ABS - ZORTRAX E ENSAIOS
Mass	2.34556e+08 Mg
Bounding Box	{-24.8068, -24.0992, 0}-{25.1932, 25.9008, 100}

Loads & Restraints



Load Summary

Description	Type	Definition
Load 4	Pressure	43.3 MPa

Restraint Summary

Description	Definition
Restraint 4	X-Fixed, Y-Fixed, Z-Fixed

Simulation Summary

Simulation run time: 00:00:11

Settings

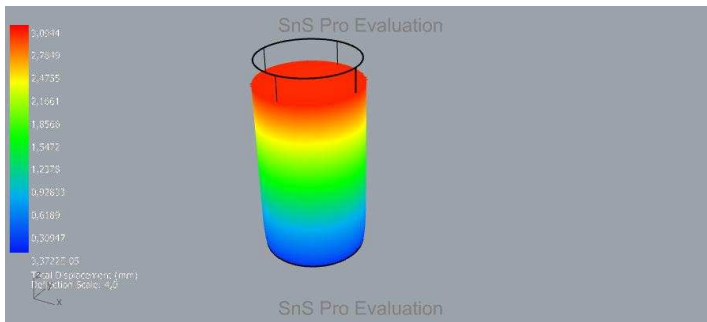
Basis Functions	
Degree	1
nx	20
ny	20
nz	37
Element size	{2.93947, 2.93947, 2.93947}
Resolution setting	10000
Computation Box	
min. corner	{-27.7267, -27.0359, -2.92119}
max. corner	{28.1233, 28.8141, 102.9}
Linear Solver	
Solver	Auto: DSS @ < 100000

Units

Quantity	Unit
Length	mm
Mass	Mg
Force	N
Time	s

Simulation Results

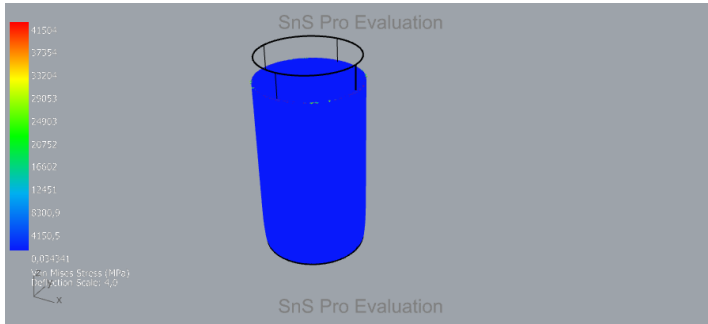
Displacements



Displacement Summary

	Amount	Location
Minimum	3,3722E-005 mm	0,1932, 0,9008, 0,0000
Maximum	3,0944E+000 mm	18,9243, 17,4581, 100,0000

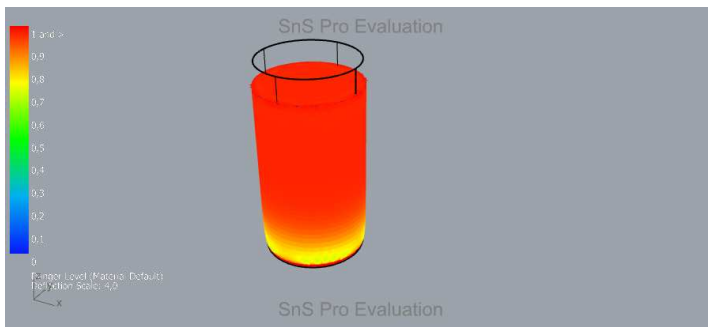
Von Mises Stress



Von Mises Stress Summary

	Amount	Location
Minimum	3,4341E-002 MPa	0,1932, 0,9008, 0,0000
Maximum	4,1504E+004 MPa	-14,3728, 21,2191, 100,0000

Danger Level



Danger Level Summary

	Amount	Location
Minimum	7,6654E-004	0,1932, 0,9008, 0,0000
Maximum	Criterion Limit Exceeded	-14,3728, 21,2191, 100,0000

Results Extrema

	Minimum	Maximum
X-Displacement	-4,4367E-001 mm	4,4572E-001 mm
Y-Displacement	-4,4063E-001 mm	4,4890E-001 mm
Z-Displacement	-3,0399E+000 mm	1,9909E-004 mm
Total Displacement	3,3722E-005 mm	3,0944E+000 mm
Von Mises Stress	3,4341E-002 MPa	4,1504E+004 MPa
Max. Principal Stress	-1,7832E+005 MPa	2,1817E+004 MPa
Mid. Principal Stress	-1,9086E+005 MPa	1,4357E+004 MPa
Min. Principal Stress	-2,1554E+005 MPa	7,7537E+003 MPa

ANEXO 13 - CPs Z10A-100% (ZORTRAX) - ABS

Scan&Solve™ Simulation Summary

Simulation run time: 00:00:12
quarta-feira, 5 de fevereiro de 2020 08:40:46

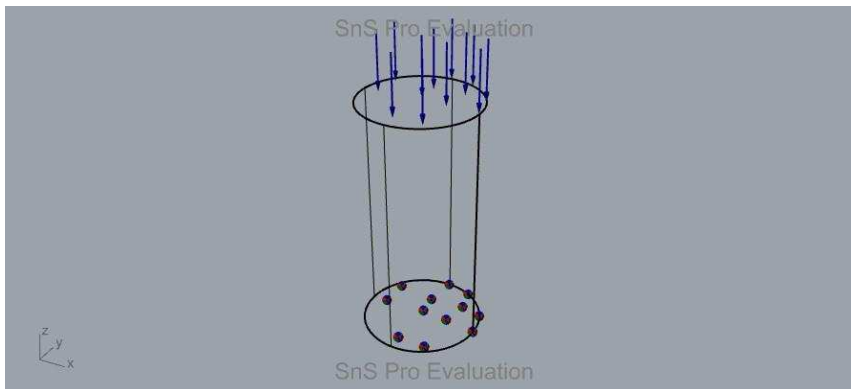
Material Summary

Property	Value
Description	ABS
Density	1.049e-09 Mg/mm ³
Elastic Modulus	2400 MPa
Default Failure Criterion	von Mises
Tensile Yield Strength	44.8 MPa

Component Geometry Summary

Quantity	Unit
Component	8dff61c6-5869-4178-aac2-38fca12599c5
Material	ABS
Mass	2.05899e+08 Mg
Bounding Box	{-24.924, -25.076, 0}-{25.076, 24.924, 100}

Loads & Restraints



Load Summary

Description	Type	Definition
Load 0	Pressure	56.93 MPa

Restraint Summary

Description	Definition
Restraint 0	X-Fixed, Y-Fixed, Z-Fixed

Simulation Summary

Simulation run time: 00:00:12

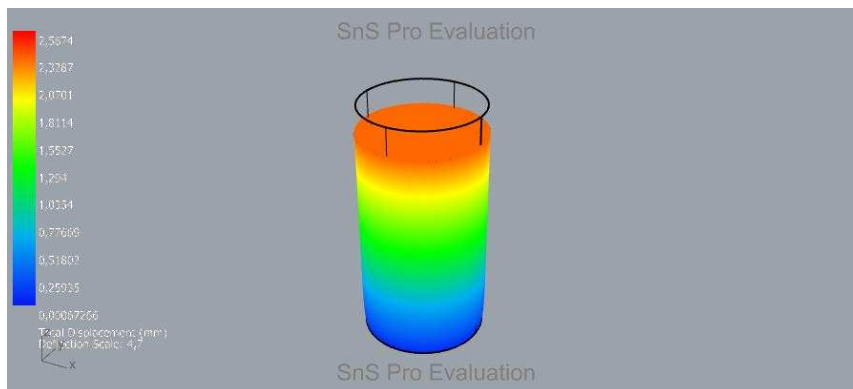
SeUngs

Basis Functions	
Degree	1
nx	20
ny	20
nz	37
Element size	{2.93947, 2.93947, 2.93947}
Resolution setting	10000
Computation Box	
min. corner	{-27.8439, -28.0127, -2.92119}
max. corner	{28.0061, 27.8373, 102.9}
Linear Solver	
Solver	Auto: DSS @ < 100000

Units

Quantity	Unit
Length	mm
Mass	Mg
Force	N
Time	s

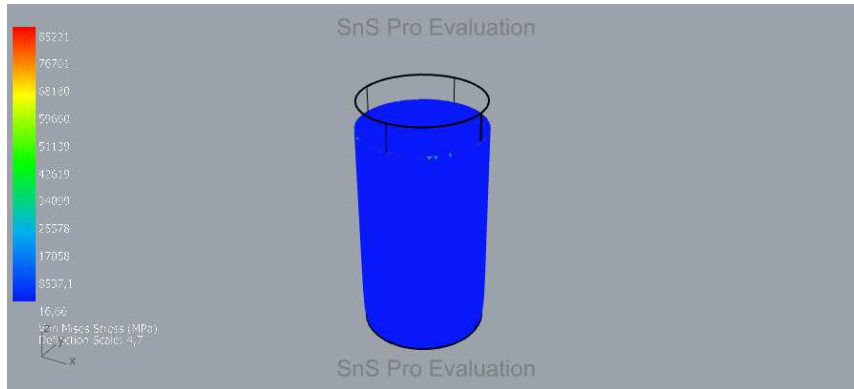
Simulation Results Displacements



Displacement Summary

	Amount	Location
Minimum	6,7266E-004 mm	0,0760, -0,0760, 0,0000
Maximum	2,5874E+000 mm	-16,4814, 18,6551, 100,0000

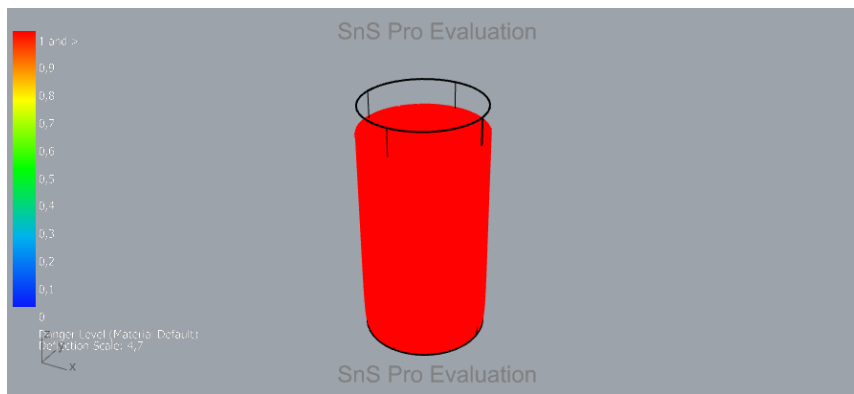
Von Mises Stress



Von Mises Stress Summary

	Amount	Location
Minimum	1,6660E+001 MPa	0,0760, -0,0760, 0,0000
Maximum	8,5221E+004 MPa	-16,4814, 18,6551, 100,0000

Danger Level



Danger Level Summary

	Amount	Location
Minimum	3,7187E-001	0,0760, -0,0760, 0,0000
Maximum	Criterion Limit Exceeded	-16,4814, 18,6551, 100,0000

Results Extrema

	Minimum	Maximum
X-Displacement	-2,3680E-001 mm	2,4399E-001 mm
Y-Displacement	-2,3660E-001 mm	2,4380E-001 mm
Z-Displacement	-2,5668E+000 mm	-4,8766E-004 mm
Total Displacement	6,7266E-004 mm	2,5874E+000 mm
Von Mises Stress	1,6660E+001 MPa	8,5221E+004 MPa
Max. Principal Stress	-8,6111E+004 MPa	3,9240E+004 MPa
Mid. Principal Stress	-9,0832E+004 MPa	2,0506E+004 MPa
Min. Principal Stress	-1,7359E+005 MPa	1,9289E+004 MPa

ANEXO 14 - CPs Z10A-100% (ZORTRAX) - ABS - STANDARD DEVIATION MODEL

Scan&Solve™ Simulation Summary

Simulation run time: 00:00:12
quarta-feira, 5 de fevereiro de 2020 08:41:49

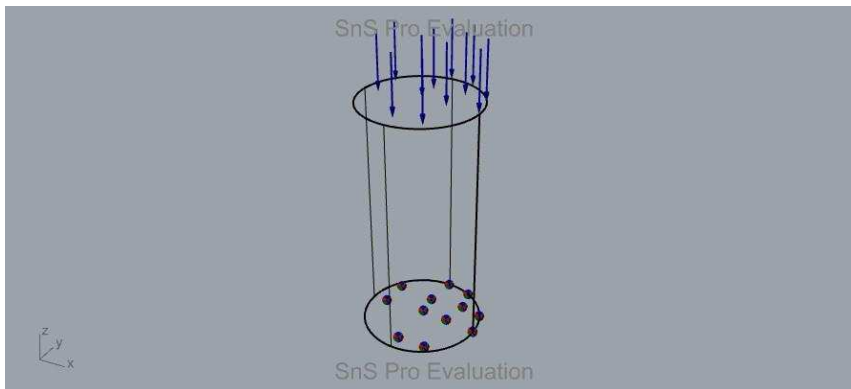
Material Summary

Property	Value
Description	ABS - STANDARD DEVIATION MODEL
Density	1.122e-09 Mg/mm ³
Elastic Modulus	1898 MPa
Default Failure Criterion	von Mises
Tensile Yield Strength	44.8 MPa

Component Geometry Summary

Quantity	Unit
Component	8dff61c6-5869-4178-aac2-38fca12599c5
Material	ABS - STANDARD DEVIATION MODEL
Mass	2.20227e+08 Mg
Bounding Box	{-24.924, -25.076, 0}-{25.076, 24.924, 100}

Loads & Restraints



Load Summary

Description	Type	Definition
Load 0	Pressure	56.93 MPa

Restraint Summary

Description	Definition
Restraint 0	X-Fixed, Y-Fixed, Z-Fixed

Simulation Summary

Simulation run time: 00:00:12

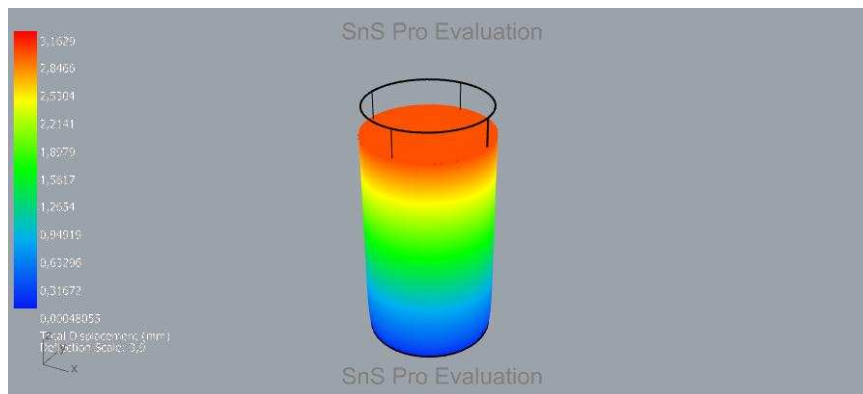
SeUngs

Basis Functions	
Degree	1
nx	20
ny	20
nz	37
Element size	{2.93947, 2.93947, 2.93947}
Resolution setting	10000
Computation Box	
min. corner	{-27.8439, -28.0127, -2.92119}
max. corner	{28.0061, 27.8373, 102.9}
Linear Solver	
Solver	Auto: DSS @ < 100000

Units

Quantity	Unit
Length	mm
Mass	Mg
Force	N
Time	s

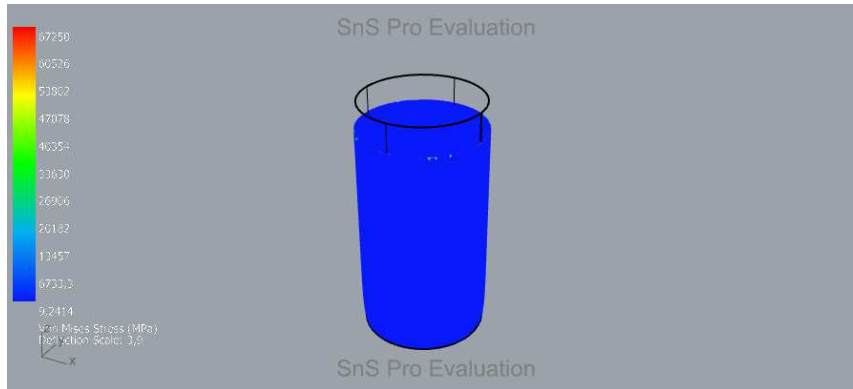
Simulation Results Displacements



Displacement Summary

	Amount	Location
Minimum	4,8055E-004 mm	0,0760, -0,0760, 0,0000
Maximum	3,1629E+000 mm	-16,4814, 18,6551, 100,0000

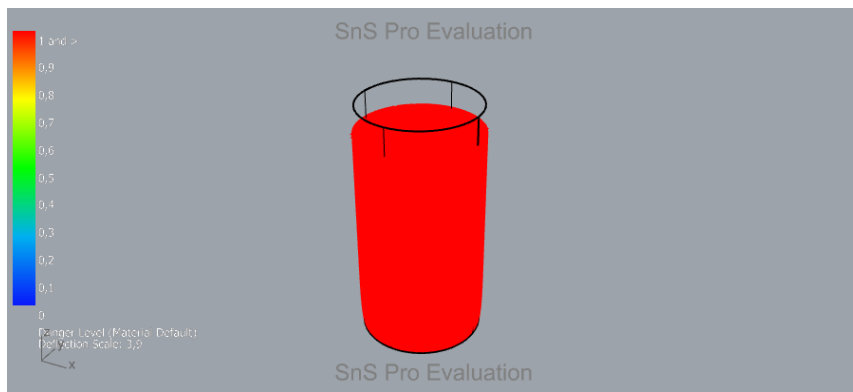
Von Mises Stress



Von Mises Stress Summary

	Amount	Location
Minimum	9,2414E+000 MPa	0,0760, -0,0760, 0,0000
Maximum	6,7250E+004 MPa	-14,4899, 20,2423, 100,0000

Danger Level



Danger Level Summary

	Amount	Location
Minimum	2,0628E-001	0,0760, -0,0760, 0,0000
Maximum	Criterion Limit Exceeded	-14,4899, 20,2423, 100,0000

Results Extrema

	Minimum	Maximum
X-Displacement	-3,8032E-001 mm	3,7182E-001 mm
Y-Displacement	-3,7026E-001 mm	3,7474E-001 mm
Z-Displacement	-3,1243E+000 mm	-1,4999E-004 mm
Total Displacement	4,8055E-004 mm	3,1629E+000 mm
Von Mises Stress	9,2414E+000 MPa	6,7250E+004 MPa
Max. Principal Stress	-1,2012E+005 MPa	4,0694E+004 MPa
Mid. Principal Stress	-1,2857E+005 MPa	2,6468E+004 MPa
Min. Principal Stress	-1,8817E+005 MPa	2,2658E+004 MPa

ANEXO 15 - CPs Z10A-100% (ZORTRAX) - ABS - ZORTRAX E ENSAIOS

Scan&Solve™ Simulation Summary

Simulation run time: 00:00:11
quarta-feira, 5 de fevereiro de 2020 08:42:41

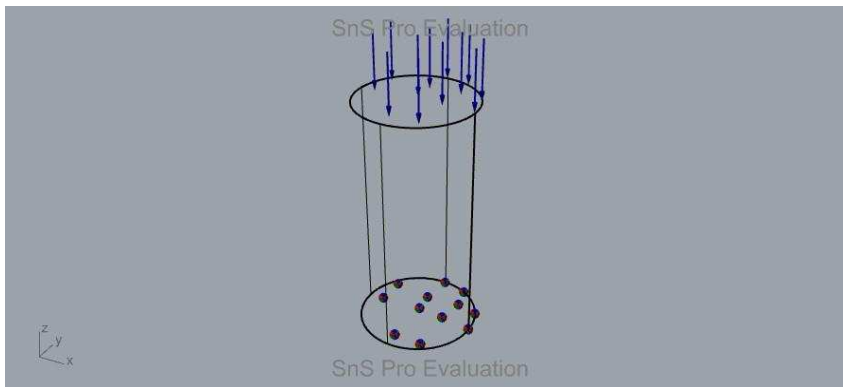
Material Summary

Property	Value
Description	ABS - ZORTRAX E ENSAIOS
Density	1.195e-09 Mg/mm ³
Elastic Modulus	1396 MPa
Default Failure Criterion	von Mises
Tensile Yield Strength	44.8 MPa

Component Geometry Summary

Quantity	Unit
Component	8dff61c6-5869-4178-aac2-38fca12599c5
Material	ABS - ZORTRAX E ENSAIOS
Mass	2.34556e+08 Mg
Bounding Box	{-24.924, -25.076, 0}-{25.076, 24.924, 100}

Loads & Restraints



Load Summary

Description	Type	Definition
Load 0	Pressure	56.93 MPa

Restraint Summary

Description	Definition
Restraint 0	X-Fixed, Y-Fixed, Z-Fixed

Simulation Summary

Simulation run time: 00:00:11

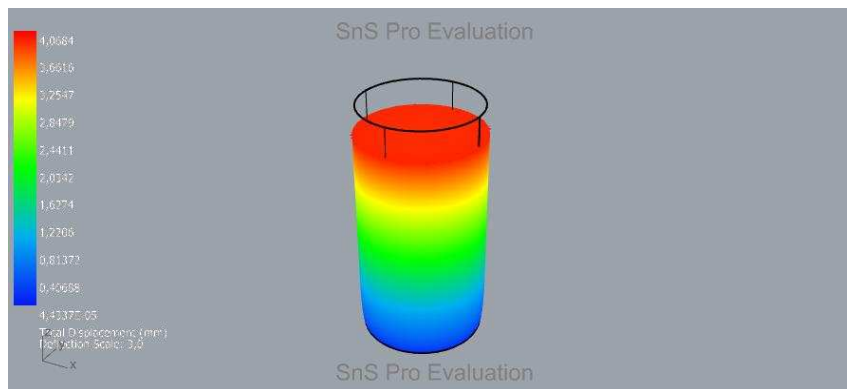
SeUngs

Basis Functions	
Degree	1
nx	20
ny	20
nz	37
Element size	{2.93947, 2.93947, 2.93947}
Resolution setting	10000
Computation Box	
min. corner	{-27.8439, -28.0127, -2.92119}
max. corner	{28.0061, 27.8373, 102.9}
Linear Solver	
Solver	Auto: DSS @ < 100000

Units

Quantity	Unit
Length	mm
Mass	Mg
Force	N
Time	s

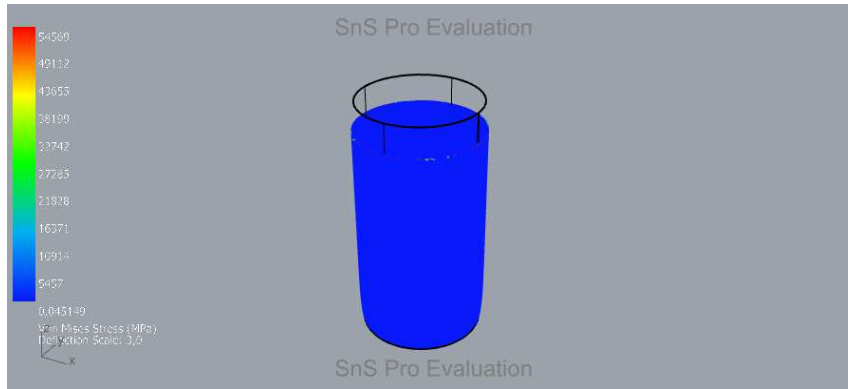
Simulation Results Displacements



Displacement Summary

	Amount	Location
Minimum	4,4337E-005 mm	0,0760, -0,0760, 0,0000
Maximum	4,0684E+000 mm	18,8071, 16,4814, 100,0000

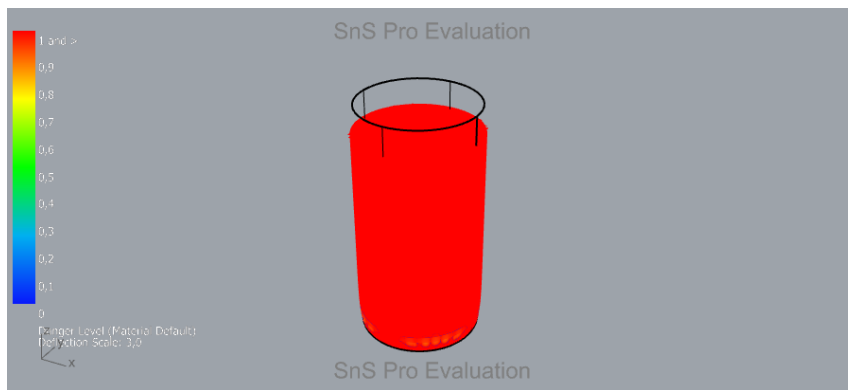
Von Mises Stress



Von Mises Stress Summary

	Amount	Location
Minimum	4,5149E-002 MPa	0,0760, -0,0760, 0,0000
Maximum	5,4569E+004 MPa	-14,4899, 20,2423, 100,0000

Danger Level



Danger Level Summary

	Amount	Location
Minimum	1,0078E-003	0,0760, -0,0760, 0,0000
Maximum	Criterion Limit Exceeded	-14,4899, 20,2423, 100,0000

Results Extrema

	Minimum	Maximum
X-Displacement	-5,8333E-001 mm	5,8603E-001 mm
Y-Displacement	-5,7934E-001 mm	5,9020E-001 mm
Z-Displacement	-3,9968E+000 mm	2,6176E-004 mm
Total Displacement	4,4337E-005 mm	4,0684E+000 mm
Von Mises Stress	4,5149E-002 MPa	5,4569E+004 MPa
Max. Principal Stress	-2,3446E+005 MPa	2,8686E+004 MPa
Mid. Principal Stress	-2,5095E+005 MPa	1,8877E+004 MPa
Min. Principal Stress	-2,8339E+005 MPa	1,0195E+004 MPa

ANEXO 16 - CPs 5A-100% (CUBEX + ZORTRAX) - ABS

Scan&Solve™ Simulation Summary

Simulation run time: 00:00:11

terça-feira, 4 de fevereiro de 2020 17:18:52

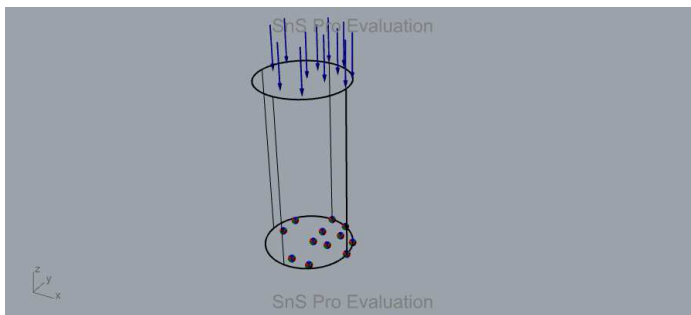
Material Summary

Property	Value
Description	ABS
Density	1.049e-09 Mg/mm ³
Elastic Modulus	2400 MPa
Default Failure Criterion	von Mises
Tensile Yield Strength	44.8 MPa

Component Geometry Summary

Quantity	Unit
Component	e8648a76-516f-4560-95d3-9af22b6d99c3
Material	ABS
Mass	2.57374e+07 Mg
Bounding Box	{-12.5605, -12.5398, 0}-{12.4395, 12.4602, 50}

Loads & Restraints



Load Summary

Description	Type	Definition
Load 0	Pressure	42.78 MPa

Restraint Summary

Description	Definition
Restraint 0	X-Fixed, Y-Fixed, Z-Fixed

Simulation Summary

Simulation run time: 00:00:11

Settings

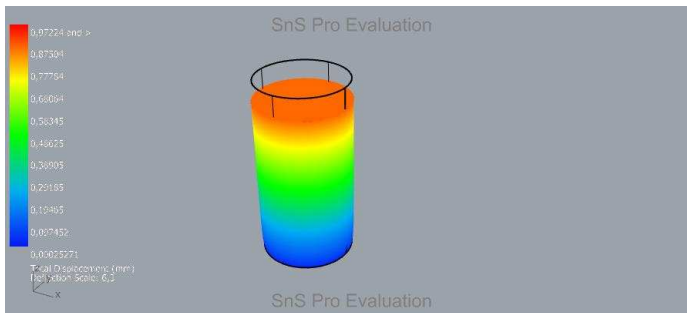
Basis Functions	
Degree	1
nx	20
ny	20
nz	37
Element size	{1.46973, 1.46973, 1.46973}
Resolution setting	10000
Computation Box	
min. corner	{-14.0204, -14.008, -1.46045}
max. corner	{13.9045, 13.9168, 51.4498}
Linear Solver	
Solver	Auto: DSS @ < 100000

Units

Quantity	Unit
Length	mm
Mass	Mg
Force	N
Time	s

Simulation Results

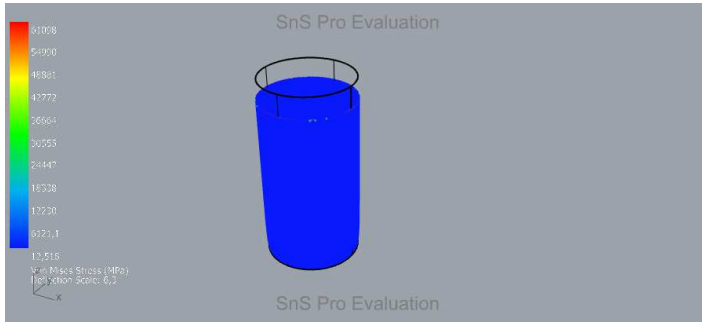
Displacements



Displacement Summary

	Amount	Location
Minimum	2,5271E-004 mm	-0,0605, -0,0398, 0,0000
Maximum	9,7224E-001 mm	-8,3392, 9,3258, 50,0000

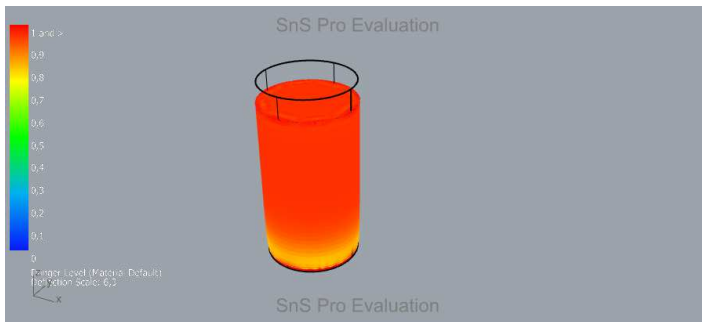
Von Mises Stress



Von Mises Stress Summary

	Amount	Location
Minimum	1,2518E+001 MPa	-0,0605, -0,0398, 0,0000
Maximum	6,1098E+004 MPa	-8,3392, 9,3258, 50,0000

Danger Level



Danger Level Summary

	Amount	Location
Minimum	2,7942E-001	-0,0605, -0,0398, 0,0000
Maximum	Criterion Limit Exceeded	-8,3392, 9,3258, 50,0000

Results Extrema

	Minimum	Maximum
X-Displacement	-8,9238E-002 mm	9,1916E-002 mm
Y-Displacement	-8,9119E-002 mm	9,1848E-002 mm
Z-Displacement	-9,6448E-001 mm	-1,8337E-004 mm
Total Displacement	2,5271E-004 mm	9,7224E-001 mm
Von Mises Stress	1,2518E+001 MPa	6,1098E+004 MPa
Max. Principal Stress	-6,1592E+004 MPa	2,7832E+004 MPa
Mid. Principal Stress	-6,5024E+004 MPa	1,4521E+004 MPa
Min. Principal Stress	-1,2433E+005 MPa	1,3612E+004 MPa

**ANEXO 17 - CPs 5A-100% (CUBEX + ZORTRAX) -
ABS - STANDARD DEVIATION MODEL**

Scan&Solve™ Simulation Summary

Simulation run time: 00:00:11

terça-feira, 4 de fevereiro de 2020 17:20:45

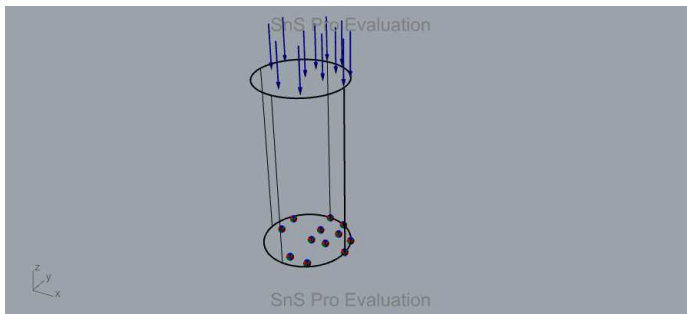
Material Summary

Property	Value
Description	ABS - STANDARD DEVIATION MODEL
Density	1.122e-09 Mg/mm ³
Elastic Modulus	1898 MPa
Default Failure Criterion	von Mises
Tensile Yield Strength	44.8 MPa

Component Geometry Summary

Quantity	Unit
Component	e8648a76-516f-4560-95d3-9af22b6d99c3
Material	ABS - STANDARD DEVIATION MODEL
Mass	2.75284e+07 Mg
Bounding Box	{-12.5605, -12.5398, 0}-{12.4395, 12.4602, 50}

Loads & Restraints



Load Summary

Description	Type	Definition
Load 0	Pressure	42.78 MPa

Restraint Summary

Description	Definition
Restraint 0	X-Fixed, Y-Fixed, Z-Fixed

Simulation Summary

Simulation run time: 00:00:11

Settings

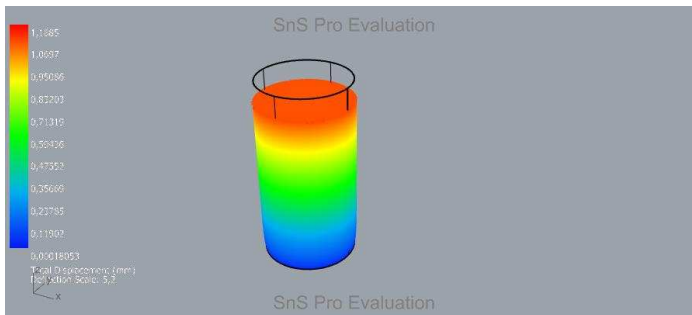
Basis Functions	
Degree	1
nx	20
ny	20
nz	37
Element size	{1.46973, 1.46973, 1.46973}
Resolution setting	10000
Computation Box	
min. corner	{-14.0204, -14.008, -1.46045}
max. corner	{13.9045, 13.9168, 51.4498}
Linear Solver	
Solver	Auto: DSS @ < 100000

Units

Quantity	Unit
Length	mm
Mass	Mg
Force	N
Time	s

Simulation Results

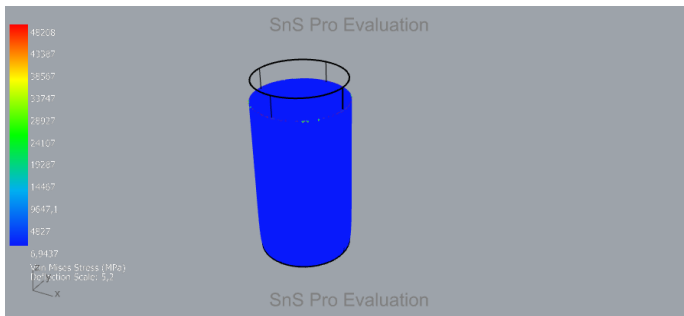
Displacements



Displacement Summary

	Amount	Location
Minimum	1,8053E-004 mm	-0,0605, -0,0398, 0,0000
Maximum	1,1885E+000 mm	-8,3392, 9,3258, 50,0000

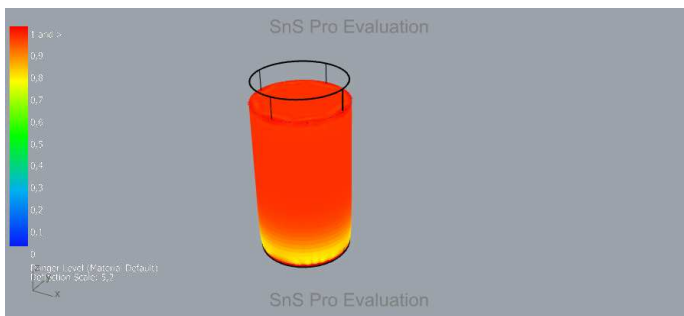
Von Mises Stress



Von Mises Stress Summary

	Amount	Location
Minimum	6,9437E+000 MPa	-0,0605, -0,0398, 0,0000
Maximum	4,8208E+004 MPa	-7,3435, 10,1194, 50,0000

Danger Level



Danger Level Summary

	Amount	Location
Minimum	1,5499E-001	-0,0605, -0,0398, 0,0000
Maximum	Criterion Limit Exceeded	-7,3435, 10,1194, 50,0000

Results Extrema

	Minimum	Maximum
X-Displacement	-1,4340E-001 mm	1,4011E-001 mm
Y-Displacement	-1,3959E-001 mm	1,4128E-001 mm
Z-Displacement	-1,1740E+000 mm	-5,6462E-005 mm
Total Displacement	1,8053E-004 mm	1,1885E+000 mm
Von Mises Stress	6,9437E+000 MPa	4,8208E+004 MPa
Max. Principal Stress	-8,5921E+004 MPa	2,8899E+004 MPa
Mid. Principal Stress	-9,2061E+004 MPa	1,8718E+004 MPa
Min. Principal Stress	-1,3483E+005 MPa	1,5902E+004 MPa

ANEXO 18 - CPs 5A-100% (CUBEX + ZORTRAX) - ABS - ZORTRAX E ENSAIOS

Scan&Solve™ Simulation Summary

Simulation run time: 00:00:11

terça-feira, 4 de fevereiro de 2020 17:21:44

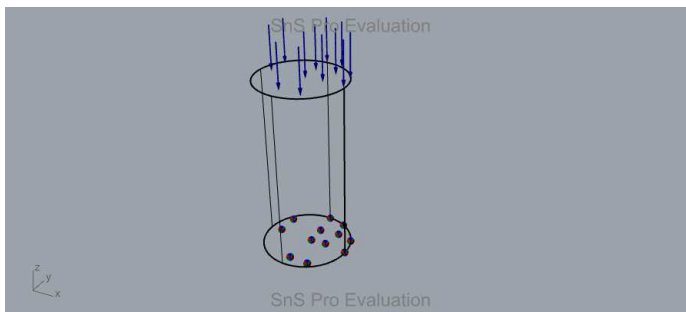
Material Summary

Property	Value
Description	ABS - ZORTRAX E ENSAIOS
Density	1.195e-09 Mg/mm ³
Elastic Modulus	1396 MPa
Default Failure Criterion	von Mises
Tensile Yield Strength	44.8 MPa

Component Geometry Summary

Quantity	Unit
Component	e8648a76-516f-4560-95d3-9af22b6d99c3
Material	ABS - ZORTRAX E ENSAIOS
Mass	2.93195e+07 Mg
Bounding Box	{-12.5605, -12.5398, 0}-{12.4395, 12.4602, 50}

Loads & Restraints



Load Summary

Description	Type	Definition
Load 0	Pressure	42.78 MPa

Restraint Summary

Description	Definition
Restraint 0	X-Fixed, Y-Fixed, Z-Fixed

Simulation Summary

Simulation run time: 00:00:11

Settings

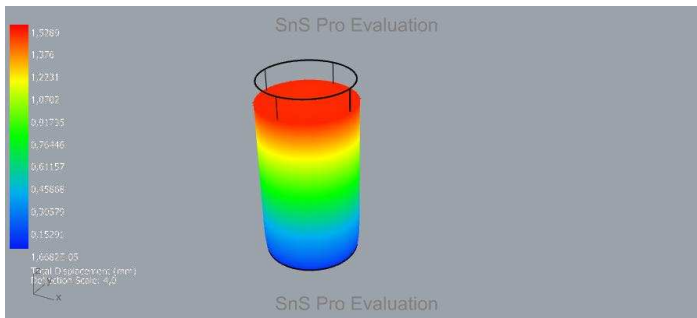
Basis Functions	
Degree	1
nx	20
ny	20
nz	37
Element size	{1.46973, 1.46973, 1.46973}
Resolution setting	10000
Computation Box	
min. corner	{-14.0204, -14.008, -1.46045}
max. corner	{13.9045, 13.9168, 51.4498}
Linear Solver	
Solver	Auto: DSS @ < 100000

Units

Quantity	Unit
Length	mm
Mass	Mg
Force	N
Time	s

Simulation Results

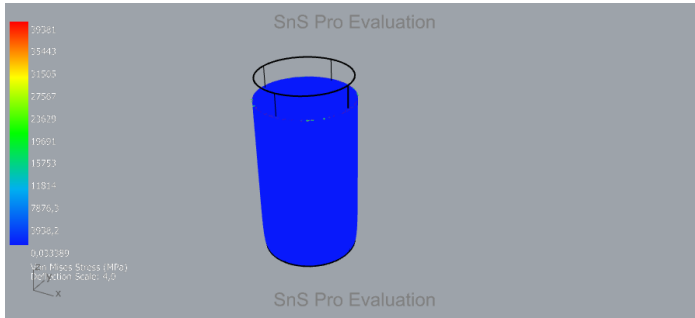
Displacements



Displacement Summary

	Amount	Location
Minimum	1,6682E-005 mm	-0,0605, -0,0398, 0,0000
Maximum	1,5289E+000 mm	9,3050, 8,2389, 50,0000

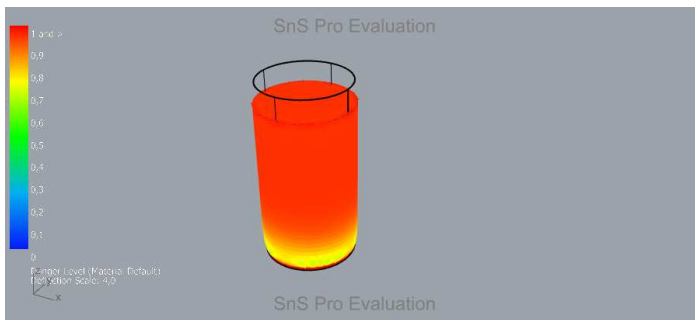
Von Mises Stress



Von Mises Stress Summary

	Amount	Location
Minimum	3,3389E-002 MPa	-0,0605, -0,0398, 0,0000
Maximum	3,9381E+004 MPa	-7,3435, 10,1194, 50,0000

Danger Level



Danger Level Summary

	Amount	Location
Minimum	7,4528E-004	-0,0605, -0,0398, 0,0000
Maximum	Criterion Limit Exceeded	-7,3435, 10,1194, 50,0000

Results Extrema

	Minimum	Maximum
X-Displacement	-2,2000E-001 mm	2,2107E-001 mm
Y-Displacement	-2,1852E-001 mm	2,2265E-001 mm
Z-Displacement	-1,5019E+000 mm	9,8351E-005 mm
Total Displacement	1,6682E-005 mm	1,5289E+000 mm
Von Mises Stress	3,3389E-002 MPa	3,9381E+004 MPa
Max. Principal Stress	-1,6802E+005 MPa	2,0034E+004 MPa
Mid. Principal Stress	-1,7995E+005 MPa	1,2932E+004 MPa
Min. Principal Stress	-2,0332E+005 MPa	6,5976E+003 MPa

ANEXO 19 - CPs 10A-100% (CUBEX + ZORTRAX) - ABS

Scan&Solve™ Simulation Summary

Simulation run time: 00:00:12

terça-feira, 4 de fevereiro de 2020 17:24:15

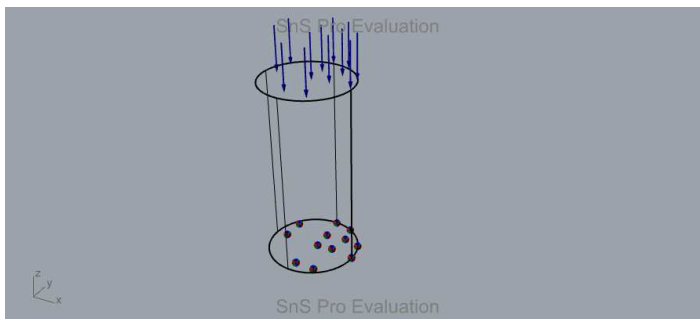
Material Summary

Property	Value
Description	ABS
Density	1.049e-09 Mg/mm ³
Elastic Modulus	2400 MPa
Default Failure Criterion	von Mises
Tensile Yield Strength	44.8 MPa

Component Geometry Summary

Quantity	Unit
Component	e8648a76-516f-4560-95d3-9af22b6d99c3
Material	ABS
Mass	2.57374e+07 Mg
Bounding Box	{-12.5605, -12.5398, 0}-{12.4395, 12.4602, 50}

Loads & Restraints



Load Summary

Description	Type	Definition
Load 0	Pressure	57.26 MPa

Restraint Summary

Description	Definition
Restraint 0	X-Fixed, Y-Fixed, Z-Fixed

Simulation Summary

Simulation run time: 00:00:12

Settings

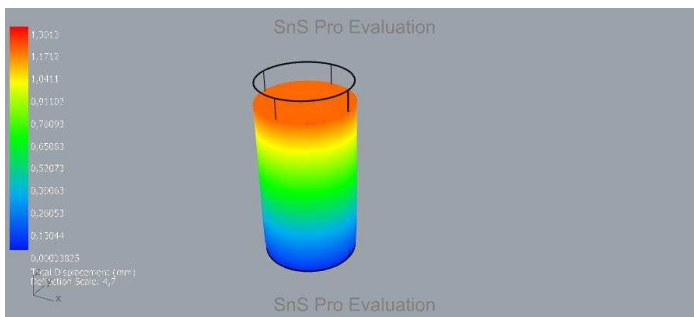
Basis Functions	
Degree	1
nx	20
ny	20
nz	37
Element size	{1.46973, 1.46973, 1.46973}
Resolution setting	10000
Computation Box	
min. corner	{-14.0204, -14.008, -1.46045}
max. corner	{13.9045, 13.9168, 51.4498}
Linear Solver	
Solver	Auto: DSS @ < 100000

Units

Quantity	Unit
Length	mm
Mass	Mg
Force	N
Time	s

Simulation Results

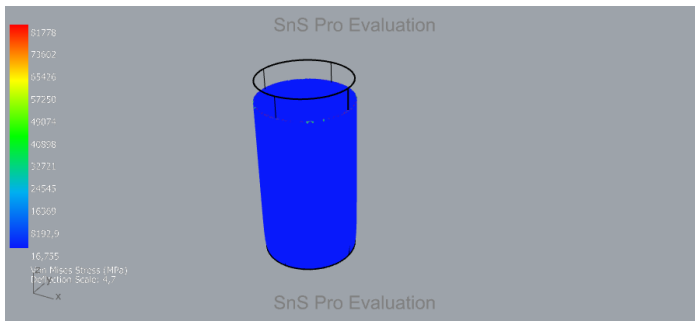
Displacements



Displacement Summary

	Amount	Location
Minimum	3,3825E-004 mm	-0,0605, -0,0398, 0,0000
Maximum	1,3013E+000 mm	-8,3392, 9,3258, 50,0000

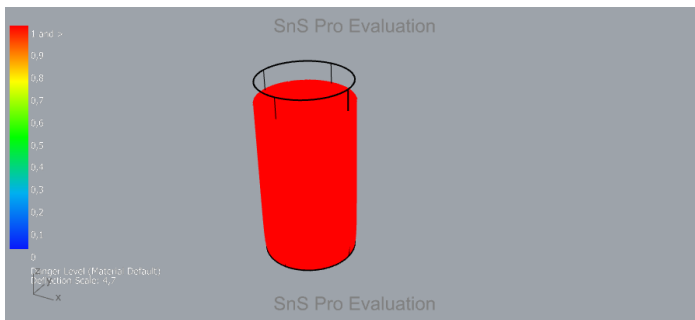
Von Mises Stress



Von Mises Stress Summary

	Amount	Location
Minimum	1,6755E+001 MPa	-0,0605, -0,0398, 0,0000
Maximum	8,1778E+004 MPa	-8,3392, 9,3258, 50,0000

Danger Level



Danger Level Summary

	Amount	Location
Minimum	3,7399E-001	-0,0605, -0,0398, 0,0000
Maximum	Criterion Limit Exceeded	-8,3392, 9,3258, 50,0000

Results Extrema

	Minimum	Maximum
X-Displacement	-1,1944E-001 mm	1,2303E-001 mm
Y-Displacement	-1,1928E-001 mm	1,2294E-001 mm
Z-Displacement	-1,2909E+000 mm	-2,4543E-004 mm
Total Displacement	3,3825E-004 mm	1,3013E+000 mm
Von Mises Stress	1,6755E+001 MPa	8,1778E+004 MPa
Max. Principal Stress	-8,2439E+004 MPa	3,7253E+004 MPa
Mid. Principal Stress	-8,7034E+004 MPa	1,9436E+004 MPa
Min. Principal Stress	-1,6642E+005 MPa	1,8220E+004 MPa

**ANEXO 20 - CPs 10A-100% (CUBEX + ZORTRAX) -
ABS - STANDARD DEVIATION MODEL**

Scan&Solve™ Simulation Summary

Simulation run time: 00:00:11

terça-feira, 4 de fevereiro de 2020 17:25:07

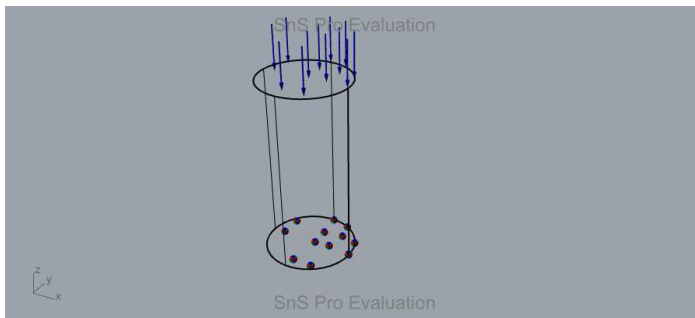
Material Summary

Property	Value
Description	ABS - STANDARD DEVIATION MODEL
Density	1.122e-09 Mg/mm ³
Elastic Modulus	1898 MPa
Default Failure Criterion	von Mises
Tensile Yield Strength	44.8 MPa

Component Geometry Summary

Quantity	Unit
Component	e8648a76-516f-4560-95d3-9af22b6d99c3
Material	ABS - STANDARD DEVIATION MODEL
Mass	2.75284e+07 Mg
Bounding Box	{-12.5605, -12.5398, 0}-{12.4395, 12.4602, 50}

Loads & Restraints



Load Summary

Description	Type	Definition
Load 0	Pressure	57.26 MPa

Restraint Summary

Description	Definition
Restraint 0	X-Fixed, Y-Fixed, Z-Fixed

Simulation Summary

Simulation run time: 00:00:11

Settings

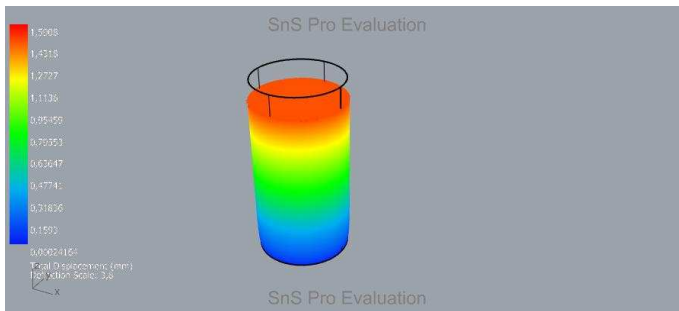
Basis Functions	
Degree	1
nx	20
ny	20
nz	37
Element size	{1.46973, 1.46973, 1.46973}
Resolution setting	10000
Computation Box	
min. corner	{-14.0204, -14.008, -1.46045}
max. corner	{13.9045, 13.9168, 51.4498}
Linear Solver	
Solver	Auto: DSS @ < 100000

Units

Quantity	Unit
Length	mm
Mass	Mg
Force	N
Time	s

Simulation Results

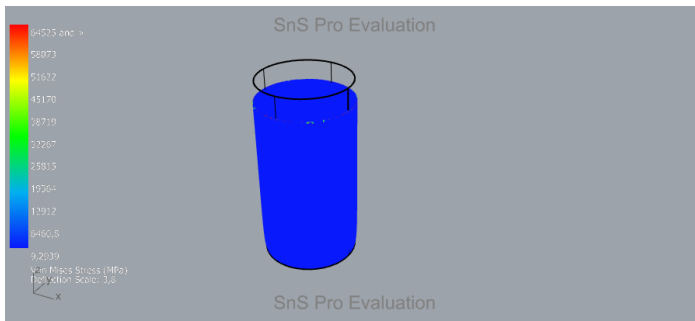
Displacements



Displacement Summary

	Amount	Location
Minimum	2,4164E-004 mm	-0,0605, -0,0398, 0,0000
Maximum	1,5908E+000 mm	-8,3392, 9,3258, 50,0000

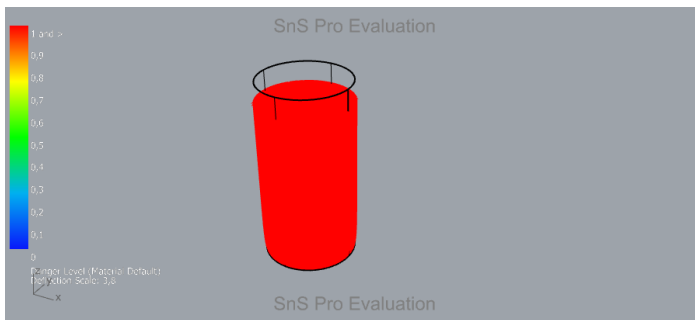
Von Mises Stress



Von Mises Stress Summary

	Amount	Location
Minimum	9,2939E+000 MPa	-0,0605, -0,0398, 0,0000
Maximum	6,4525E+004 MPa	-7,3435, 10,1194, 50,0000

Danger Level



Danger Level Summary

	Amount	Location
Minimum	2,0745E-001	-0,0605, -0,0398, 0,0000
Maximum	Criterion Limit Exceeded	-7,3435, 10,1194, 50,0000

Results Extrema

	Minimum	Maximum
X-Displacement	-1,9194E-001 mm	1,8753E-001 mm
Y-Displacement	-1,8684E-001 mm	1,8910E-001 mm
Z-Displacement	-1,5713E+000 mm	-7,5572E-005 mm
Total Displacement	2,4164E-004 mm	1,5908E+000 mm
Von Mises Stress	9,2939E+000 MPa	6,4525E+004 MPa
Max. Principal Stress	-1,1500E+005 MPa	3,8681E+004 MPa
Mid. Principal Stress	-1,2322E+005 MPa	2,5054E+004 MPa
Min. Principal Stress	-1,8047E+005 MPa	2,1284E+004 MPa

ANEXO 21 - CPs 10A-100% (CUBEX + ZORTRAX) - ABS - ZORTRAX E ENSAIOS

Scan&Solve™ Simulation Summary

Simulation run time: 00:00:11

terça-feira, 4 de fevereiro de 2020 17:26:04

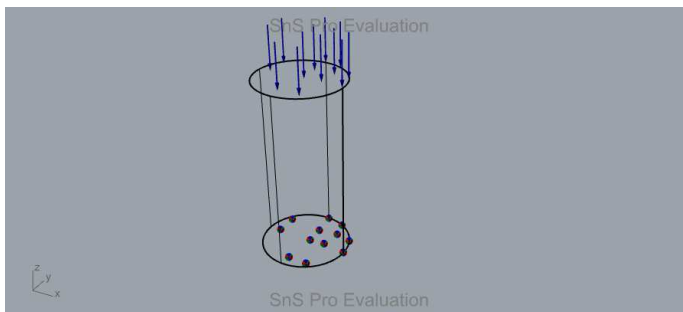
Material Summary

Property	Value
Description	ABS - ZORTRAX E ENSAIOS
Density	1.195e-09 Mg/mm ³
Elastic Modulus	1396 MPa
Default Failure Criterion	von Mises
Tensile Yield Strength	44.8 MPa

Component Geometry Summary

Quantity	Unit
Component	e8648a76-516f-4560-95d3-9af22b6d99c3
Material	ABS - ZORTRAX E ENSAIOS
Mass	2.93195e+07 Mg
Bounding Box	{-12.5605, -12.5398, 0}-{12.4395, 12.4602, 50}

Loads & Restraints



Load Summary

Description	Type	Definition
Load 0	Pressure	57.26 MPa

Restraint Summary

Description	Definition
Restraint 0	X-Fixed, Y-Fixed, Z-Fixed

Simulation Summary

Simulation run time: 00:00:11

Settings

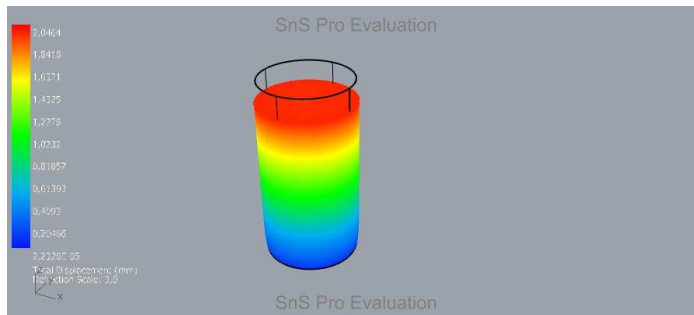
Basis Functions	
Degree	1
nx	20
ny	20
nz	37
Element size	{1.46973, 1.46973, 1.46973}
Resolution setting	10000
Computation Box	
min. corner	{-14.0204, -14.008, -1.46045}
max. corner	{13.9045, 13.9168, 51.4498}
Linear Solver	
Solver	Auto: DSS @ < 100000

Units

Quantity	Unit
Length	mm
Mass	Mg
Force	N
Time	s

Simulation Results

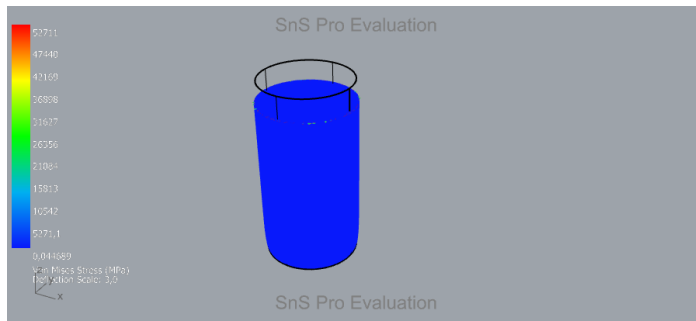
Displacements



Displacement Summary

	Amount	Location
Minimum	2,2328E-005 mm	-0,0605, -0,0398, 0,0000
Maximum	2,0464E+000 mm	9,3050, 8,2389, 50,0000

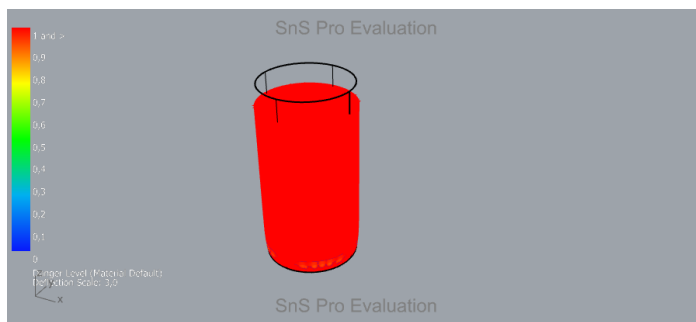
Von Mises Stress



Von Mises Stress Summary

	Amount	Location
Minimum	4,4689E-002 MPa	-0,0605, -0,0398, 0,0000
Maximum	5,2711E+004 MPa	-7,3435, 10,1194, 50,0000

Danger Level



Danger Level Summary

	Amount	Location
Minimum	9,9752E-004	-0,0605, -0,0398, 0,0000
Maximum	Criterion Limit Exceeded	-7,3435, 10,1194, 50,0000

Results Extrema

	Minimum	Maximum
X-Displacement	-2,9447E-001 mm	2,9589E-001 mm
Y-Displacement	-2,9248E-001 mm	2,9802E-001 mm
Z-Displacement	-2,0102E+000 mm	1,3164E-004 mm
Total Displacement	2,2328E-005 mm	2,0464E+000 mm
Von Mises Stress	4,4689E-002 MPa	5,2711E+004 MPa
Max. Principal Stress	-2,2489E+005 MPa	2,6815E+004 MPa
Mid. Principal Stress	-2,4085E+005 MPa	1,7309E+004 MPa
Min. Principal Stress	-2,7214E+005 MPa	8,8308E+003 MPa