

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

ARACELI MUNAIER GUEDES DE ALMEIDA

**ESTUDO DA POSSIBILIDADE DE UTILIZAÇÃO DO POLÍMERO
ACRILONITRILO-BUTADIENO-ESTIRENO PROCESSADO VIA IMPRESÃO 3D
PARA PRODUÇÃO DE EMBALAGENS RETORNÁVEIS DE FLUXOS LOGÍSTICOS
PARA A INDÚSTRIA AUTOMOTIVA**

BELO HORIZONTE

2016

ARACELI MUNAIER GUEDES DE ALMEID

ESTUDO DA POSSIBILIDADE DE UTILIZAÇÃO DO POLÍMERO
ACRILONITRILO-BUTADIENO-ESTIRENO PROCESSADO VIA IMPRESÃO 3D PARA
PRODUÇÃO DE EMBALAGENS RETORNÁVEIS DE FLUXOS LOGÍSTICOS PARA A
INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no
Curso de Graduação em Engenharia de Materiais
do Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia de
Materiais.

Orientadora: Roberta Viana Ferreira

BELO HORIZONTE

2016

ARACELI MUNAIER GUEDES DE ALMEIDA

ESTUDO DA POSSIBILIDADE DE UTILIZAÇÃO DO POLÍMERO
ACRILONITRILO-BUTADIENO-ESTIRENO PROCESSADO VIA IMPRESÃO 3D PARA
PRODUÇÃO DE EMBALAGENS RETORNÁVEIS DE FLUXOS LOGÍSTICOS PARA A
INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no
Curso de Graduação em Engenharia de Materiais
do Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia de
Materiais.

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a Roberta Viana Ferreira – Orientadora

Prof. Dr. Marcello Rosa Dumont

Prof^a. Dr^a. Aline Bruna da Silva

AGRADECIMENTOS

À toda a minha família, pelo apoio e amor incondicionais de sempre.

À melhor mãe do mundo, por ser meu porto seguro e estar sempre presente, pelo incentivo em perseguir os sonhos, por ser meu maior exemplo. Ao meu pai, por ter me ensinado a importância dos estudos e da leitura, por acreditar em mim. Ao meu irmão, por defender e cuidar da nossa família, pelo carinho e suporte de sempre.

À minha avó, pela sabedoria e valores passados. À Tia Wanda, pelo acolhimento e cuidado.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET – MG) por ter ajudado a construir não só a profissional, mas a pessoa que sou hoje. Aos meus professores, que ensinam conteúdos acadêmicos e valores para a vida.

À Roberta Viana, pelo suporte ao longo de todo este trabalho, pela orientação e paciência. Por enfrentar comigo o desafio de um projeto desafiador e inovador.

À Fiat Chrysler Automobiles (FCA), por ser um centro de desenvolvimento e aprendizado, por me permitir combinar teoria e prática, pela experiência de trabalho em um ambiente dinâmico, inovador e multicultural.

Aos colegas de trabalho, que estiveram sempre dispostos a ensinar e acolher. Ao Valentino Mancini, pela confiança depositada. À Carolina Goulart, pela compreensão, pelas oportunidades, por ser um exemplo de profissional e pessoa. Ao Jon Schwartz, pelos conselhos dados, pela experiência compartilhada. Ao Felipe Pereira, pela amizade, sabedoria e caronas oferecidos.

Às amigadas do ensino médio e faculdade; àqueles que se tornaram minha família durante o intercâmbio; à cada pessoa que me marcou de algum modo e eu espero levar para a vida.

Aos amigos que me apoiaram nessa jornada, em especial João Paulo Eleutério, Rita Morais, Isabela Ribeiro, André Carvalhais, Pedro Cordeiro e Camila Mourão.

Sem cada um de vocês, a conclusão dessa etapa não teria sido possível. Obrigada!

RESUMO

No mundo competitivo das indústrias automotivas, a utilização de embalagens retornáveis em fluxos de logística reversa entre as montadoras e os fornecedores emerge como potencial gerador de vantagens econômicas e ambientais. Para tal aplicação, as embalagens devem possuir uma combinação de propriedades, afetada principalmente pela escolha do material constituinte das mesmas, que englobe: resistência mecânica (suporte o peso das peças e as atividades inerentes ao carregamento, armazenagem e transporte), resistência à corrosão, facilidade de manutenção, leveza e baixo custo. Como opções tradicionais disponíveis no mercado atualmente, tem-se caixas plásticas de polipropileno ou polietileno de alta densidade e os chamados racks metálicos, constituídos por estrutura em aço. Nesse âmbito, o copolímero de acrilonitrila-estireno-butadieno (ABS) se mostra como promissor candidato à tal funcionalidade, devido à sua combinação de propriedades, em destaque a tenacidade e resistência ao impacto, associados a um custo relativamente baixo de fabricação. Assim, o presente trabalho se propôs a fabricar peças de ABS, via Impressão 3D - Moldagem por Fusão e Deposição (FDM), e caracterizar as mesmas, para avaliação do seu uso em embalagens retornáveis, em substituição aos materiais clássicos. A análise da morfologia e das respostas mecânicas do ABS impresso permitiu concluir que se trata de uma opção de material viável do ponto de vista técnico para aplicação em embalagens em fluxos de retorno logístico.

Palavras-chave: Embalagens retornáveis. Copolímero acrilonitrila-estireno-butadieno. Impressão 3D.

ABSTRACT

In a world that becomes more competitive every day for automotive industries, the use of returnable packaging in reversal logistics flows between automakers and suppliers emerges as a potential creator of economic and environmental advantages. In order to use packages for such applications, a combination of properties, influenced especially by the material choice, is required to be achieved: mechanical resistance (ability to withstand the parts weight and the activities inherent in the loading, storage and transportation processes), corrosion resistance, ease of maintenance, lightweight and low cost. Some traditional options available in the market today are the KLT plastic boxes, made of polypropylene or high-density polyethylene and the metallic racks, structured in steel. In this context, the copolymer acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) appears as a feasible candidate, due to its properties combination, highlighted the tenacity and impact resistance, associated with a relatively low fabrication cost. Hence, the present work fabricates, via 3D Printing by Fused Deposition Modeling (FDM), and characterizes ABS parts, in order to evaluate the use in returnable packages, in substitution to the classically used materials. By analyzing the morphology and the mechanical responses, it was possible to conclude that the ABS is a viable material option, from the technical standpoint, for returnable packages in reverse logistics flows.

Key-words: Returnable packages. Copolymer acrylonitrile-butadiene-styrene. 3D Printing.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
	Objetivo	10
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
1.1	Logística.....	11
2.2	Logística Reversa.....	12
2.3	Embalagens Retornáveis.....	13
2.4	Acrilonitrila-Estireno-Butadieno	17
2.5	Prototipagem Rápida e Impressão 3D	19
	Moldagem por Fusão e Deposição (Fused Deposition Modeling – FDM)	21
	2.6.5 Mecânica da Fratura	22
3	METODOLOGIA.....	24
2.1	Elaboração das Amostras em Software de Design 3D.....	24
3.2	Impressão das Amostras de ABS em Impressora 3D	24
3.3	Ensaio Mecânicos.....	26
	3.3.1 Ensaio de Compressão.....	26
	3.3.2 Ensaio de Impacto Izod	27
3.4	Microscopia Eletrônica de Transmissão	28
3.5	Calorimetria Exploratória de Varredura (DSC).....	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	29
4.1	Desenho 3D.....	29
4.2	Impressão das amostras de ABS	29
4.3	Ensaio Mecânico de Compressão	33
4.4	Ensaio Mecânico de Impacto Izod.....	36

4.5	Microscopia Eletrônica de Transmissão (MEV)	39
4.6	Calorimetria Exploratória de Varredura (DSC).....	44
5	CONCLUSÃO.....	47
	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

A logística, vista de forma ampla, envolve todo o planejamento, execução e controle de fluxos de materiais e informações que permitem a fabricação, venda e entrega do produto ou serviço final ao cliente (SAKAI, 2005; SANTOS, 2008).

Em um mundo cada vez mais competitivo, o ramo da logística reversa emerge como gerador de vantagem competitiva ao atuar no controle de fluxos de retorno pós-venda e pós consumo (LEITE, 2003).

Um elemento de destaque no âmbito da logística reversa é o fluxo de retorno de embalagens industriais, o qual se destaca devida às vantagens ambientais e econômicas associadas. Pensando-se no caso específico da indústria automobilística, a utilização de embalagens retornáveis se mostra como um desafio promissor. Ao mesmo tempo em que tal fluxo reverso aparece como possível gerador de vantagem competitiva, novas e complexas necessidades de gerenciamento e infraestrutura surgem. As embalagens assumem novo papel na cadeia de fornecimento, e precisam ser desenvolvidas considerando não só aspectos como resistência, leveza e baixo custo, como também a acomodação otimizada das cargas e adequação ao modal de transporte empregado (NUNES; ROCHA; SELLITTO, 2014).

Neste contexto, surgem no mercado embalagens padronizadas com aplicação específica para o setor automotivo. Destacam-se as caixas plásticas, tipicamente fabricadas em polipropileno ou polietileno de alta densidade, e os racks metálicos, em geral estruturados em aço e revestidos de acordo com a necessidade do cliente.

Na busca por novos materiais aptos a atender os requisitos de fluxo de retorno das montadoras, o copolímero Acrilonitrila-Estireno-Butadieno (ABS) aparece como promissora opção, devido a sua combinação de propriedades: tenacidade, resistência química e ao calor, resistência ao impacto, retenção das propriedades a baixa temperatura, rigidez, brilho superficial e facilidade de processamento (PINTO, 2012).

Entre as muitas opções de processamento para o ABS, a impressão 3D, em especial pela técnica de Moldagem por Fusão e Deposição (FDM), vem ganhando destaque recentemente, pela capacidade de produzir formas complexas e detalhadas construídas com auxílio computacional.

Visando testar a possibilidade da utilização do polímero ABS na fabricação de embalagens empregadas em fluxos de logística reversa, o presente trabalho consistiu da produção e caracterização de peças de ABS produzidas pela técnica FDM.

Objetivo

Analisar a possibilidade de utilização do ABS como matéria prima na fabricação de embalagens para fluxos de logística reversa na indústria automobilística, através da técnica de moldagem por fusão e deposição. A avaliação foi feita com base em uma comparação entre os materiais tradicionais hoje utilizados em embalagens retornáveis - polipropileno (PP) e polietileno de alta densidade (PEAD), em caixas plásticas do tipo KLT, e aço 1020 em racks metálicos.

Como objetivos específicos, ressalta-se:

- Desenhar em software computacional e produzir peças constituídas de ABS, através da técnica FDM.
- Caracterizar mecanicamente as peças impressas, através de ensaios de compressão e impacto.
- Caracterizar morfológicamente a micro estrutura com auxílio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).
- Avaliar o comportamento térmico do ABS antes do processamento e após a fusão e extrusão na impressora 3D.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Logística

Logística engloba todo o processo de planejamento, execução e controle dos fluxos de insumos (matérias primas e outros componentes necessários à produção), produtos acabados e informações associadas, dos fornecedores aos clientes finais (SAKAI, 2005).

A logística compreende o elo entre o mercado e as atividades operacionais de uma empresa. O escopo de atuação da logística estende-se sobre toda a organização, do gerenciamento de matérias-primas até a entrega do produto final (SCANDOLARA, 2010).

À medida que o mundo foi se globalizando nas últimas décadas, as atividades logísticas tornaram-se mais complexas e dispendiosas. Observa-se uma proliferação de produtos no mercado, os quais possuem ciclos de vida cada vez menores, e atendem clientes exigentes. Tal complexidade é inevitavelmente acompanhada por aumentos de custo das atividades logísticas, o que as coloca em posição de destaque nas competências centrais de qualquer empresa moderna (MAIA, 2009).

O grande desafio da logística é entregar o produto solicitado pelo cliente, na quantidade requisitada, na condição especificada, no local definido e no momento estabelecido, a um custo adequado (MORELLI, 2012). Proporcionalmente ao aumento da variedade dos produtos, da quantidade de clientes e fornecedores, aumenta a demanda por uma cadeia de abastecimento otimizada e custo-efetiva.

Ao longo dos anos, o conceito de logística tem sido aprimorado, surgindo como ferramenta empenhada na busca de trâmites mais rápidos e rentáveis, os quais possibilitem às organizações a obtenção de certo fôlego competitivo, para gerenciar concorrentes perspicazes e um mercado extremamente competitivo (MENEZES, 2012).

De forma mais ampla, a cadeia de suprimentos de uma indústria pode ser descrita como o conjunto de fornecedores, manufaturas, atacadistas, varejistas e distribuidores que tornam possível a fabricação, venda e entrega ao cliente e consumidor final um produto ou serviço (SANTOS, 2008). De acordo com tal definição, pode-se enxergar a logística como uma das partes centrais da cadeia de suprimentos, focada no controle de fluxos e armazenagem de materiais, serviços e informações.

Se no passado a logística compreendia apenas o transporte de alimentos e munição para tropas em campo de combate, hoje representa o controle de processos gerenciais, desde o transporte para entrada de matéria prima nas empresas até a distribuição de produtos ao consumidor final (NETO; SANTANA, 2015).

O transporte de materiais, sejam eles matérias-primas, produtos em fabricação ou produtos acabados, sempre foi foco da gestão industrial, visto que o tema se encontra estreitamente ligado ao layout e à estrutura física de instalações e por ter implicações diretas na produtividade, na qualidade, na segurança no local de trabalho e nos custos da operação (MACHLINE, 2011).

2.2 Logística Reversa

Sabe-se que o termo Logística abrange a entrada de materiais na fábrica (*inputs*), o transporte interno (*material handling*), a saída (*outputs*), a logística reversa (*reverse*) e a reciclagem (MACHLINE, 2011).

Pode-se definir Logística Reversa (LR) como a área que planeja, opera e controla o fluxo e as informações, associadas ao retorno dos bens de pós-vendas e de pós-consumo, ao ciclo de negócios ou ao ciclo produtivo. Por meio dos canais de distribuição reversos, agrega-se valor de diversas naturezas a tais bens de pós-vendas e consumo: econômico, ecológico, legal, logístico, de imagem corporativa, entre outros (LEITE, 2003).

Práticas de logística reversa têm se tornado importante fator gerador de vantagem competitiva, destacadamente devido a aspectos econômicos e ambientais. Contudo, apesar dos substanciais ganhos da LR, muitas empresas ainda enfrentam dificuldades no gerenciamento dos fluxos de retorno. O rápido crescimento no volume de retornos pode superar a capacidade das empresas para gerenciá-lo, de modo a tornar o complexo processo de gerenciamento um entrave à sua adoção (NUNES; ROCHA; SELITTO, 2014).

Um dos principais elementos presentes em fluxos de retorno são as embalagens industriais. O uso de embalagens com tipologia descartável gera expressivo volume de resíduos, contribuindo para a saturação dos aterros sanitários e para eventual escassez de matérias-primas (NUNES; ROCHA; SELITTO, 2014).

A recuperação de embalagens, seja para reutilização ou para reciclagem, se torna um aspecto essencial gerador de vantagens econômicas e ambientais. Um exemplo prático, quanto à

reciclagem e reaproveitamento, é a prática adotada pela Fiat Chrysler Automobiles do Brasil de reaproveitar embalagens de motores na produção de isolantes acústicos. Outro exemplo é a fabricante de motores MWM Internacional, a qual utiliza embalagens plásticas retornáveis, em substituição às de madeira (descartáveis), na exportação de cabeçotes (BORCHARDT et al., 2008).

O emprego de embalagens reutilizáveis tem se intensificado no mercado industrial. Tal prática depende, contudo, de diversas considerações a serem feitas tanto no projeto das embalagens, como na cadeia logística como um todo. É importante desenvolver embalagens leves e resistentes, de baixo custo, as quais otimizem a carga e previnam danos durante o transporte. Além disso, pode-se apontar como necessidade gerencial a integração de rotas, já que embalagens reutilizáveis são transportadas na direção oposta à distribuição. A infraestrutura de transporte responsável por tais fluxos precisa elaborar soluções que considerem simultaneamente, tanto a via direta como a reversa, definindo uma rota com entregas e coletas. Ainda é válido ressaltar que existem prejuízos associados à logística reversa de embalagens, tais como: maiores custos unitários de transporte (baixa densidade da embalagem vazia); complexidade do gerenciamento de um fluxo assimétrico (ida diferente da volta), preocupações com o processamento da embalagem (recepção, armazenamento, limpeza, manutenção), e menor retorno do capital investido, dado o valor mais baixo remanescente no produto retornado (NUNES; ROCHA; SELLITTO, 2014).

2.3 Embalagens Retornáveis

O emprego de processos produtivos complexos impulsiona a necessidade de se utilizar embalagens fabricadas a partir dos mais diversos materiais e formas para atender as demandas da indústria e do mercado. Acondicionar o produto final passa a ser apenas uma das funções da embalagem. A embalagem passa a ser presença durante as etapas de fabricação e transporte, recebendo matérias-primas, componentes diversos e produtos semiacabados em seu interior (CASTRO, 2005).

A tipologia de embalagens utilizada afeta diretamente a movimentação e transporte, assim como o tempo necessário para realizar operações de carga e descarga. Embalagens padronizadas, definidas em acordo entre transportador, fornecedor e indústria, contribuem para reduzir o tempo

da operação de movimentação de materiais durante o transporte para abastecimento do cliente (MOURA, 2000).

Um importante fator a ser considerado no estudo de embalagens é o tipo de material que a compõe. A matéria-prima utilizada define custos, tecnologias, estruturas de mercado, finalidade de uso, etc. No Brasil, de forma geral, pode-se destacar como os principais materiais utilizados na fabricação de embalagens: vidro, metal, madeira, papel, papelão e plásticos (LIMA, 2003).

A Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA), visando estimular as melhores práticas quanto à adoção de embalagens entre parceiros de negócios, define alguns requisitos aplicáveis a toda e qualquer embalagem do setor automotivo (ANFAVEA, 2012):

- Preferência para embalagens retornáveis.
- Uso preferencial de plástico (filme ou bolha) na cor branca de polietileno.
- Adequação às leis ambientais vigentes.
- Madeira que não seja retornável só pode ser utilizada sob aprovação especial (admite-se somente eucalipto ou pinus).
- A embalagem deve ter alta reciclabilidade, sendo que o processo e possíveis vias de reutilização devem ser indicados.
- A mistura de materiais que dificultem reciclagem pós-vida útil, como por exemplo poliuretano (PU) colado a policloreto de polivinila (PVC), peças metálicas inseridas em plásticos, isopor colado em papelão, etc., deve ser evitada.
- O material deve ser livre de elementos potencialmente poluidores (metais pesados) ou que ofereçam risco à saúde.
- Plásticos moldados de difícil reciclagem só deverão ser utilizados quando não existir outro material para substituí-lo e somente com aprovação por escrito de todos os envolvidos no processo, quer seja no cliente ou no fornecedor e em casos especiais junto aos órgãos legisladores.

No mercado, as tipologias de embalagem padronizadas retornáveis mais comumente encontradas são:

- Caixas KLT (Transporte de Pequenas Cargas): Trata-se de uma ampla família modular de caixa plástica de transporte destinadas a atender as demandas de logística e movimentação de materiais pesados e leves, especialmente em sistemas automatizados industriais,

conforme ilustrado na Figura 1. Tipicamente fabricadas em polipropileno (PP) ou polietileno de alta densidade (PEAD), as caixas plásticas KLT consistem de uma construção que oferece resistência e rigidez. As dimensões variam de acordo com a necessidade do cliente, mas uma configuração comum possui 40 cm de largura, 60 cm de comprimento e 28 cm de altura (PROPLAST, 2016).

Figura 1 – Caixa plástica KLT.



Fonte: PROPLAST, 2016.

As embalagens do tipo caixas plásticas KLT possuem como principal vantagem o custo benefício, visto que atendem uma alta gama de peças utilizadas na indústria automobilística, a um valor acessível, já que suas matérias primas são polímeros do tipo *commodities*. Como desvantagem, tem-se o alto índice de danificação e conseqüente necessidade de reposição e a limitação de tamanho (estruturas maiores estariam associadas a maior peso em peças dentro da embalagem, para os quais as matérias primas não possuem resistência suficiente).

- Racks Metálicos: Embalagem metálica constituída por estrutura de aço, com acabamento em opções que incluem galvanização, zincagem, pintura em esmalte sintético ou tinta epóxi, garantindo resistência mecânica e à corrosão, assim como apoios com revestimento de poliuretano ou borracha esponjosa, visando não danificar as peças. Devido ao maior valor agregado desse tipo de embalagem, as mesmas geralmente são fabricadas de acordo

com projeto e especificações do cliente. Exemplo de rack metálico utilizado na indústria automobilística é mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Rack metálico para transporte e armazenamento de peças automotivas.



Fonte: HGS, LOGISTIC MARKET, 2016.

As embalagens do tipo rack metálico apresentam como principais vantagens a facilidade de manutenção, em especial por técnicas de soldagem, e a elevada resistência mecânica inerente à sua matéria prima básica, o aço. Tais fatores são essenciais à aplicação das mesmas na indústria automobilística e em seus respectivos fluxos de logística reversa. A alta densidade do aço, contudo, quando comparada a materiais poliméricos, aparece como desvantagem, visto que o peso da embalagem passa a exigir maiores esforços mecanizados na sua movimentação, limita em termos de carga a quantidade de embalagens suportadas pelo veículo de transporte e afeta a capacidade de empilhamento.

É apresentada na Tabela 1 uma comparação entre as propriedades associadas aos principais materiais aplicados em embalagens retornáveis e seus respectivos custos. Vale ressaltar

que os valores apresentados são médios, podendo variar de acordo com o tipo de processamento, modificações requisitadas, quantidade solicitada para compra, etc.

Tabela 1 – Características dos materiais tradicionalmente utilizados em embalagens retornáveis.

Material	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Energia Absorvida no Impacto (J/m)	Preço (R\$/Kg)	Densidade (g/cm ³)
Aço 1020	380	*	4,00	7,86
PP	27	25	6,35	0,88
PEAD	30	140	6,12	0,95

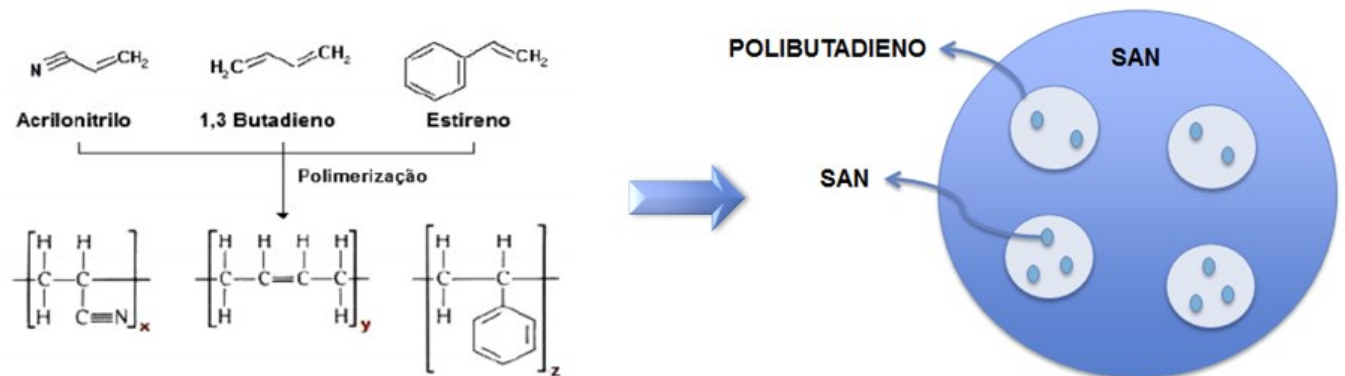
Fonte: FREIRE; MONTEIRO; CYRINO, 1994. TUDO SOBRE PLÁSTICOS, 2016. COUTINHO; MELLO; SANTA MARIA, 2003. CALLISTER, 2002. BRASKEM, 2016.

* Para aços, a energia absorvida no impacto varia na faixa entre 35J a 200J dependendo dos tratamentos térmicos aplicados (normalização, recozimento, etc.), do tamanho do grão e do processamento mecânico.

2.4 Acrilonitrila-Estireno-Butadieno

O ABS é um copolímero composto por acrilonitrila-estireno-butadieno, no qual se tem uma matriz formada de estireno-acrilonitrila (SAN), com domínios esféricos compostos por borracha de polibutadieno e subinclusões de SAN nas partículas esféricas de polibutadieno (HIRAYAMA, 2015). As subinclusões de SAN no polibutadieno proporcionam a compatibilidade entre as duas fases, visto que o SAN se encontra enxertado (*grafting*) na superfície (CÂNDIDO, 2011). Na Figura 3 é representada a estrutura química do ABS.

Figura 3 - Estrutura química do ABS e de seus monômeros.



Fonte: PINTO, 2012.

As proporções no copolímero podem variar entre 15% a 35% de acrilonitrilo, 5% a 30% de butadieno e 40% a 60% de estireno. O ABS combina a tenacidade e a resistência química e ao calor do acrilonitrilo com a resistência ao impacto e a retenção das propriedades a baixa temperatura do butadieno, enquanto o estireno, por sua vez, contribui com rigidez, brilho superficial e facilidade de processamento (PINTO, 2012).

Em termos de aplicações, o ABS é bastante empregado em peças estruturais e de aparência estética em aparelhos e utensílios de pequeno porte. Devido à sua combinação de propriedades, o ABS é amplamente utilizado nas indústrias automobilística e aeronáutica; em aparelhos eletrodomésticos e eletroeletrônicos, equipamentos de telecomunicação, brinquedos, entre outros (KUREK, 2008). Na Tabela 2 as principais características do ABS são apresentadas.

Tabela 2 – Propriedades do ABS.

Propriedade	Valor (unidades)
Densidade	1,01 a 1,09 (g/cm ³)
Índice de Fluidez (220°C/10Kg)	34 (g/10min)
Temperatura de Processamento	220 a 260 (°C)
Resistência ao Impacto Izod	144 a 566 (J/m)
Coefficiente de Fricção	0,30
Alongamento na Ruptura	0.0 à 56 (%)
Temperatura Máxima de Serviço	80 (°C)
Dureza Rockwell	93 a 115
Tensão de Ruptura	0.1 a 113 (MPa)
Módulo à Flexão	1650 a 3110 (MPa)
Temperatura de Fusão	175 (°C)
Temperatura de Transição Vítre	Fase elastomérica: - 73(°C) Matriz SAN: 109 (°C)
Estrutura	Amorfo
Preço	6,80 (R\$/Kg)

Fonte: HIRAYAMA, 2015; PINTO, 2012; PIRAMIDAL, 2016; RODA, 2014.

Comercialmente, a produção do ABS é feita através de polimerização via radical livre dos monômeros estireno e acrilonitrila, com adição de polibutadieno em uma polimerização em massa ou em emulsão (HIRAYAMA, 2015).

Com relação às técnicas de processamento, tem-se destaque para a extrusão e a moldagem por injeção, técnicas que envolvem a exposição do material a altas temperaturas e condições de cisalhamento extremas, afetando a reologia e degradação do mesmo. A escolha dos parâmetros de processo afeta enormemente as propriedades finais obtidas. Para o ABS, tem-se a temperatura de processo entre 220 °C e 260°C, visando evitar efeitos de degradação (CÂNDIDO, 2011).

2.5 Prototipagem Rápida e Impressão 3D

O termo prototipagem rápida engloba um conjunto de tecnologias cujo objetivo é fabricar objetos físicos a partir de fontes de dados geradas por sistemas de projeto, auxiliados por computador. Tais tecnologias agregam e ligam materiais, camada a camada, visando a construção tridimensional do elemento desejado. De forma geral, os processos de prototipagem rápida apresentam vantagens com relação aos métodos convencionais, tais como fresamento e torneamento. Pode-se ressaltar como principais benefícios da prototipagem rápida a economia, na ordem de 70% a 90%, de tempo e de custos na construção dos modelos. Existem hoje pelo menos sete diferentes técnicas de prototipagem rápida disponíveis comercialmente, dentre as quais a impressão 3D (GARCIA, 2010).

Os primeiros modelos de impressão 3D surgiram na década de 1980. O propósito era desenhar protótipos de forma rápida e não muito cara. Em 1989, Scott Crump patenteou a tecnologia 3D através da Moldagem por Fusão e Deposição (FDM). Durante a última década do século XX a prototipagem rápida passou a ser tratada no âmbito de processos industriais, o que levou a impressão 3D a se diferenciar em dois campos: (1) relacionado à inovação e tecnologia de ponta, associado a altos custos, complexas análises a nível de engenharia e foco por, exemplo, no ramo aeroespacial; (2) foco em sistemas de manufatura 3D, cujo objetivo era desenvolver e melhorar protótipos de impressoras que pudessem ser vendidas com margem de lucro, e que resultou nas máquinas desktop encontradas hoje no mercado. Em 2007 a companhia 3D System levou ao público impressoras por cerca de 10.000 dólares, contudo, apenas em 2009 houveram lançamentos que podem ser considerados sucessos de vendas. Em 2012-2013, já se nota um

mercado consolidado, com mudanças significativas inclusive a nível industrial (GALDEANO, 2015).

Em função da redução dos custos e conseqüente popularização das tecnologias de impressão 3D, observa-se uma intensificação e diversificação na sua utilização nos últimos anos. O destaque vai para a aplicação como ferramenta de fabricação, em função do grande benefício de redução e simplificação das etapas do processo (MONTEIRO, 2015).

O processo de impressão tem se tornado cada vez mais rápido, os equipamentos cada vez mais baratos, e uma nova variedade de materiais vem sendo utilizada. As impressoras possuem dimensões variadas, que vão desde tamanho comparativo ao de um pequeno carro, até máquinas do tamanho de um micro-ondas. Existem atualmente mais de trinta empresas focadas na fabricação de impressoras 3D, com uma variedade de padrões de qualidade, utilizando materiais como polímeros, cerâmicas e metais. Destacadamente, tem-se as empresas 3D Systems e Stratasys, as quais tiveram um crescimento no valor de suas ações na ordem de 198% e 78%, respectivamente, entre 2012 e 2013 (BHASIN; BODLA, 2014).

Em essência, a impressão 3D é um método de prototipagem através do qual um objeto real é criado a partir de um modelo 3D. A matéria-prima é adicionada camada a camada para formar o objeto final, de modo que o processo também é conhecido por manufatura por adição. O objeto 3D pode ser elaborado através do escaneamento de uma forma em um conjunto de imagens 3D, ou através do desenho utilizando um software CAD (*Computer Aided Design* – Design Auxiliado por Computador). O modelo é salvo em geral em um formato STL (STereoLitography), o qual é capaz de descrever a geometria da superfície de uma peça, para na sequência ser enviado à impressora (DESIGN TECH, 2016)

A prototipagem rápida por impressão 3D se assemelha à impressão convencional, na qual um cabeçote jorra a tinta sobre o papel. Para a impressão tridimensional, o modelo é feito em um sistema CAD, para na sequência ser transportado para o sistema CAM da máquina que fatia o objeto em camadas a serem impressas (SALMORIA et al., 2007).

Existem quatro principais tecnologias base utilizadas para a impressão 3D. São elas: (1) *Selective Layer Synthering* (SLS), a qual consiste na incisão de laser sobre um pó, sendo as regiões atingidas pelo mesmo submetidas a um processo de sinterização para compor o objeto desejado. As matérias primas englobam polímeros, metais e cerâmicas. É uma técnica indicada para situações nas quais se necessita rigor de acabamento e performance mecânica. O produto

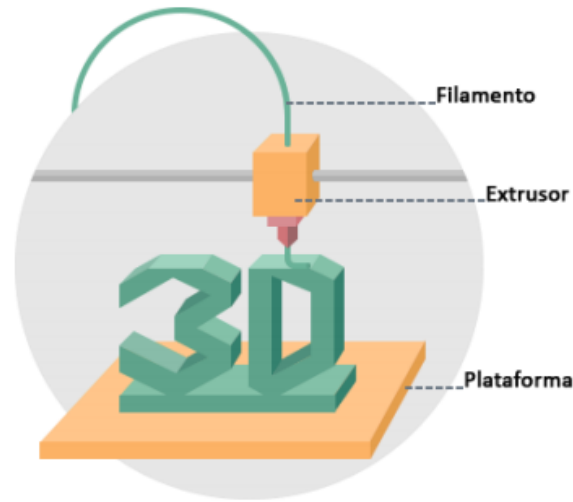
final em geral apresenta aspecto poroso; (2) *Stereolithography Apparatus* (SLA), bastante similar à anterior, com o mesmo princípio de um laser sendo utilizado para unir o material base, que neste caso é uma resina fluida, exposta à luz ultravioleta. Como desvantagem, trata-se de uma técnica mais cara, e com maior limitação na matéria prima utilizada. O acabamento obtido, contudo, é extremamente preciso, o que justifica sua aplicação destacada na indústria joalheira. Após impressão, o material precisa passar pelo processo de cura; (3) *InkJet 3D Printing*, que se baseia na deposição de camadas ultrafinas de foto-polímeros, os quais são imediatamente curados por luz UV. O sistema é capaz de fazer uma eficiente gestão de recursos e pode ser mais econômico que os outros citados. A técnica é bastante aplicada para se fazer modelos explicativos do funcionamento ou aparência de um objeto, quando não há grande preocupação com a performance mecânica; (4) *Fused Depositon Modeling* (FDM), a qual cria modelos a partir do aquecimento e extrusão de filamentos plásticos. O objeto vai sendo desenhado em uma plataforma, e à medida que o material depositado esfria e endurece, ele se liga à camada inferior. Trata-se da técnica mais utilizada e viável economicamente. Envolve o uso de termoplásticos de engenharia, resultando em construções mais fortes, duráveis e funcionais. Como matérias primas destacam-se o ABS, o policarbonato, poliamida, poliácido láctico, entre outros. É considerada uma técnica simples e fácil uso (ROCHA, 2016; DESIGN TECH, 2016).

Moldagem por Fusão e Deposição (Fused Deposition Modeling – FDM)

Em tal processo, a peça é construída por meio da deposição de material extrudado. O cabeçote extrusor é capaz de movimentar-se nos eixos X e Y, enquanto a bandeja de deposição do material se move em Z. O material é recebido pelo cabeçote continuamente na forma de fio, onde o processo de aquecimento até o ponto de fusão ocorre (OLIVEIRA, 2013).

Uma das maiores vantagens do método FDM é a variedade de materiais compatíveis. Na teoria, qualquer material em estado plástico, que possa ser comprimido por um bocal (*nozzle*) para ser extrudado, possui potencial para ser utilizado (MONTEIRO, 2015). A solução mais comum são filamentos termoplásticos de ABS, especialmente devido ao custo benefício no balanço propriedades e preço (AZEVEDO, 2013). A Figura 4 ilustra simplificada o princípio da técnica FDM.

Figura 4 - Esquema geral do processo FDM.



Fonte: MONTEIRO, 2015.

A impressão em sistemas FDM é criticamente afetada por determinados parâmetros de impressão. Tais parâmetro influenciam o modo como a peça desejada será impressa e qual a precisão dada ao produto final. Diferentes configurações podem ser necessárias de acordo o tipo de desenho e a aplicação, o que requer monitoramento constante das mesmas. Seguem alguns dos principais parâmetros de controle do processo (OSTROUT, 2015):

- Velocidade de Impressão
- Espessura das Camadas
- Temperatura do Bocal (*nozzle*) e da Plataforma
- Velocidade do Ventilador de Resfriamento
- Densidade e Padrão de Preenchimento

2.6.5 Mecânica da Fratura

O objetivo do estudo da Mecânica da Fratura é avaliação se um defeito irá ou não levar o componente a fratura catastrófica para tensões normais de serviço. Tal análise permite ainda, determinar o grau de segurança efetivo de um componente. A mecânica da fratura possibilita ao projetista valores quantitativos de tenacidade do material, tornando possível a combinação entre segurança e viabilidade econômica (STROHAECKER, 2016).

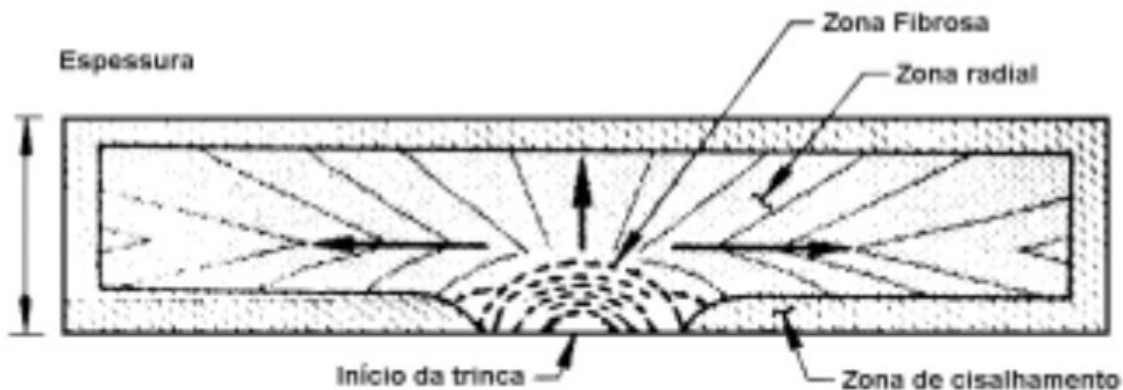
2.6.5.1 Aspectos Macroscópicos da Fratura

A superfície de fratura de um corpo pode apresentar três regiões bastante distintas: (1) Zona Fibrosa, corresponde à propagação estável da trinca, isto é, para cargas crescentes; (2) Zona Radial, corresponde a propagação instável de trinca; (3) Zona Cisalhada, inclinada a 45° do eixo de tração em consequência do alívio de triaxialidade devido à presença de uma superfície livre.

Em geral, emoldurando toda a seção do corpo, aparece a zona cisalhada, onde pode ocorrer deformação plástica, visto que não existe triaxialidade de tensões. A seguir vem a zona radial, frágil, de propagação rápida de trinca. Por fim, a terceira zona (central) é a da fratura fibrosa, dúctil. Observa-se que quanto maior a ductilidade do material estudado maior a participação das regiões cisalhada e fibrosa.

Para amostras que possuam entalhe, ocorre o deslocamento da zona fibrosa do centro do corpo para o fundo do entalhe, uma vez que o entalhe além de concentrar tensões acarreta uma região de triaxialidade de tensões (STROHAECKER, 2016). A Figura 5 ilustra as regiões em um corpo de prova entalhado.

Figura 5 – Zona fibrosa, radial e de cisalhamento para corpo entalhado.



Fonte: STROHAECKER, 2016.

Na prática, verifica-se que mesmo um material tipicamente dúctil pode se romper de maneira frágil, ou seja, sem deformação plástica apreciável. Em geral, isso ocorre quando as condições abaixo estão presentes (RODRIGUES, 2016):

- Velocidade de aplicação da carga suficientemente alta;

- Trinca ou entalhe no material;
- Temperatura de uso do material suficientemente baixa.

3 METODOLOGIA

2.1 Elaboração das Amostras em Software de Design 3D

O Software SOLID WORKS 2016, o qual permite criar, visualizar e editar modelos 3D foi utilizado para a elaboração do desenho das amostras a serem utilizadas no trabalho. Trabalhou-se com dois formatos retangulares de dimensões distintas, os quais são apresentados na Tabela 3. As dimensões foram escolhidas de acordo com as normas ASTM D695 e ASTM D256 para os ensaios mecânicos de compressão e impacto, respectivamente.

Tabela 3 – Dimensões dos corpos de prova, configuradas no Solid Works.

Dimensão	Compressão (mm)	Impacto (mm)
Comprimento	12,7	64
Largura	12,7	12,7
Espessura	25,4	3,2

Fonte: Autor.

Os arquivos obtidos encontravam-se no formato STL, sendo este um formato compatível e exportável para o software da impressora 3D.

3.2 Impressão das Amostras de ABS em Impressora 3D

As amostras foram fabricadas a partir da técnica de impressão 3D via Moldagem por Fusão e Deposição (FDM). A impressora utilizada é do modelo da Vinci 1.0, da marca XYZ Printing.

O filamento de material utilizado foi o ABS, fornecido também pela XYZ Printing. A Tabela 4 ilustra as especificações do material, divulgadas pelo fornecedor.

Tabela 4 – Especificações do filamento de ABS.

Especificação	Filamento de ABS
Temperatura de transição vítrea	70 a 90 °C
Temperatura do nozzle	210 °C
Diâmetro do filamento	1,75mm
Peso do filamento	600g

Fonte: XYZ Printing

As amostras foram projetadas em software SOLID WOKRS de acordo com as geometrias específicas para ensaios de compressão e impacto. Os parâmetros de impressão utilizados são apresentados na Tabela 5. Todas as definições de parâmetro foram realizadas no software da própria impressora, XYZware.

Tabela 5 – Parâmetros de impressão utilizados.

Parâmetro	Valor (unidade)
Diâmetro do nozzle	0,4mm
Resolução	0,4mm
Qualidade de impressão	Boa
Tipo de preenchimento	Retilíneo
% de Preenchimento	10 e 90%

Fonte: Autor.

Optou-se por variar o parâmetro “Porcentagem de Preenchimento”, utilizando-se os padrões 10% e 90%, tanto para as amostras destinadas ao ensaio de compressão, quanto para as destinadas ao ensaio de impacto. A porcentagem de preenchimento indica, na prática, o quanto de material vai ser depositado no interior da estrutura impressa. Assim, espera-se do preenchimento de 10% (mínimo ajustável na impressora) uma estrutura mais porosa, enquanto do preenchimento de 90% (máximo ajustável na impressora), a expectativa é de fabricação de amostra mais sólida. As amostras preparadas com o formato de corpos de prova para ensaio de compressão foram denominadas ABS10C para 10% de preenchimento e ABS90C para 90% de preenchimento. Já as

amostras preparadas com o formato de corpos de prova para ensaio de impacto foram denominadas ABS10I para 10% de preenchimento e ABS90I para 90% de preenchimento.

A deposição do material durante a impressão ocorre em plataforma de vidro aquecida a 90°C. Para facilitar a remoção da amostra da plataforma, aguarda-se o resfriamento de ambas até temperatura próxima à ambiente.

Com propósito de investigação do caminho de deposição obtido dentro das estruturas impressas, amostras ABS10C e ABS90C foram cortadas com auxílio de lâmina metálica e os resultados obtidos registrados com câmera do celular LENOVO K5.

A densidade aparente das amostras de impacto foi medida para se obter a massa média por volume depositada em cada tipo de preenchimento (ASB10I e ABS90I). Para tal, as massas foram pesadas com balança de precisão e a média das mesmas foi considerada, e trabalhou-se com o volume (dimensões) configurado na impressora.

3.3 Ensaios Mecânicos

As amostras de ABS com preenchimento de 10 e 90% foram caracterizadas mecanicamente via ensaios de compressão e impacto, realizados de acordo com as normas ASTM D695 e ASTM D256, respectivamente. A compressão e o impacto foram escolhidos como principais métodos de caracterização mecânica por estarem relacionados aos principais esforços aos quais uma embalagem está submetida: compressão associada ao peso da peça embalada e ao empilhamento de embalagens e impacto relaciona a operações de carga, descarga e transporte de embalagens.

3.3.1 Ensaio de Compressão

O Ensaio de Compressão foi realizado em máquina de ensaio universal no Laboratório de Polímeros do CEFET MG. A velocidade de movimentação do cabeçote foi definida em 2 mm/minuto tanto para as amostras com 10% quanto para as com 90% de preenchimento. A carga máxima da máquina é 10.000N, de forma que se optou por trabalhar com o limite de operação de 9.800N, para não haver riscos de danificar o aparelho. O ensaio foi realizado à temperatura ambiente de 25°C. A força foi aplicada em sentido paralelo ao de empilhamento das camadas impressas.

3.3.1.1 Preparação das Amostras

O preparo das amostras consistiu da uniformização das superfícies inferiores e superiores da amostra, visto que foram observadas irregularidades observadas na superfície oposta à superfície em contato com a bandeja de deposição da impressora. Tais irregularidades são potenciais fontes de erros e até mesmo capazes de inviabilizar o ensaio de compressão.

Visando criar uma superfície lisa, sem discrepância entre picos e vales visível a olho nu e não perceptível com o tato, as amostras foram lixadas com lixadeira convencional de polimento com granulação de 300 na presença de água. Todas as amostras com 10% e 90% de preenchimento foram lixadas utilizando a mesma técnica. Prepararam-se cinco amostras com 10% de preenchimento e cinco amostras com 90% de preenchimento.

3.3.2 Ensaio de Impacto Izod

O Ensaio de Impacto foi realizado em máquina de ensaio com medidor digital no Laboratório de Polímeros do CEFET MG. O martelo selecionado para o ensaio foi o de 11J. O ensaio foi realizado à temperatura ambiente de 25°C. A força foi aplicada em sentido perpendicular ao de empilhamento das camadas impressas.

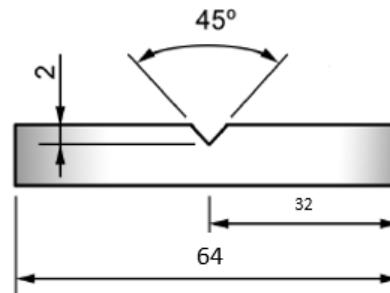
3.3.2.1 Preparação das Amostras

O pré-requisito básico para amostras a serem submetidas à ensaios de impacto, sejam eles do tipo Izod ou Charpy, é a presença de entalhe, o qual atua como concentrador de tensões, minimiza a deformação plástica e direciona a fratura no corpo de prova.

Os entalhes foram feitos após a impressão, com profundidade de 2mm e ângulo de 45°, no centro exato do corpo de prova, conforme Figura 6.

Prepararam-se cinco amostras com 10% de preenchimento e quatro amostras com 90% de preenchimento. As dimensões de cada amostra, incluindo entalhes, foram medidas com paquímetro digital e computadas na máquina de ensaio.

Figura 6 – Corpo de prova para ensaio de impacto Izod.



Fonte: Autor.

* Dimensões em milímetros.

3.4 Microscopia Eletrônica de Transmissão

A morfologia das amostras foi avaliada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) utilizando um Microscópio Eletrônico de Varredura da marca Shimadzu, modelo SSX-550.

As amostras foram recobertas com uma fina camada de ouro para a análise. As imagens foram obtidas com voltagem de aceleração de 15kV e em ampliações de 40 e 500 vezes. A morfologia foi avaliada em vista superior (direção paralela à de empilhamento das camadas) e vista lateral (direção perpendicular à de empilhamento das camadas), sendo preparadas duas amostras para cada vista: uma com 10% de preenchimento e outra com 90%.

Visando avaliar o tipo de fratura obtido com o impacto, a morfologia na região da fratura foi analisada no MEV, com aumento de 45 vezes.

3.5 Calorimetria Exploratória de Varredura (DSC)

Análises de calorimetria exploratória de varredura foram realizadas em equipamento da marca SHIMADZU modelo DSC-60, para uma amostra de filamento do ABS antes de passar pela fusão e extrusão na impressora 3D, e uma amostra após o processo de impressão. As massas das amostras de antes e depois da impressão foram de 10.4mg e 7.4mg respectivamente.

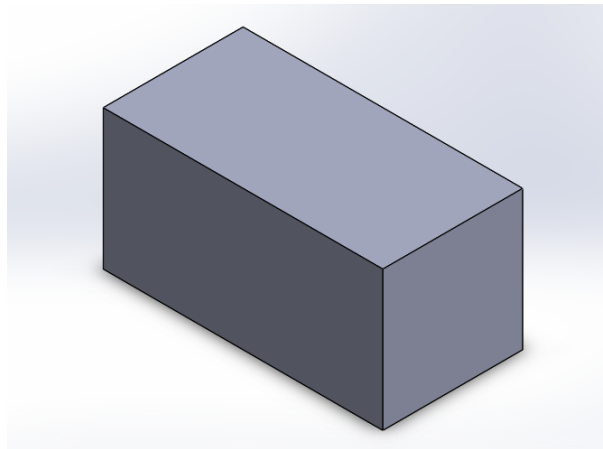
As amostras foram acondicionadas em porta-amostras de alumínio selados e aquecidos a uma taxa de 10°C/min, no intervalo de temperatura entre -50 a 300°C, com um fluxo de hélio de 30 mL/min como purga e fluxo de nitrogênio como gás protetivo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Desenho 3D

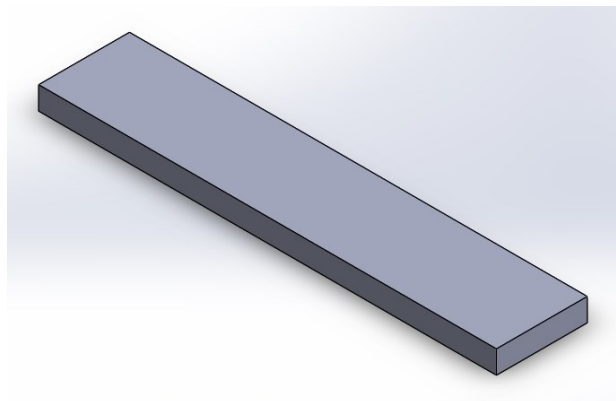
Os desenhos construídos no programa Solid Works, com dimensões definidas na Tabela 2, são apresentados nas Figuras 7 e 8.

Figura 7 – Desenho em Solid Works do corpo de prova para ensaio de compressão.



Fonte: Autor.

Figura 8 – Desenho em Solid Works do corpo de prova para ensaio de impacto.



Fonte: Autor.

4.2 Impressão das amostras de ABS

O mais importante aspecto a ser ressaltado no processo de fabricação das amostras é que a metodologia de deposição resulta em um material anisotrópico, com propriedades diferentes

avaliadas nas direções paralela e perpendicular à direção de empilhamento das camadas impressas.

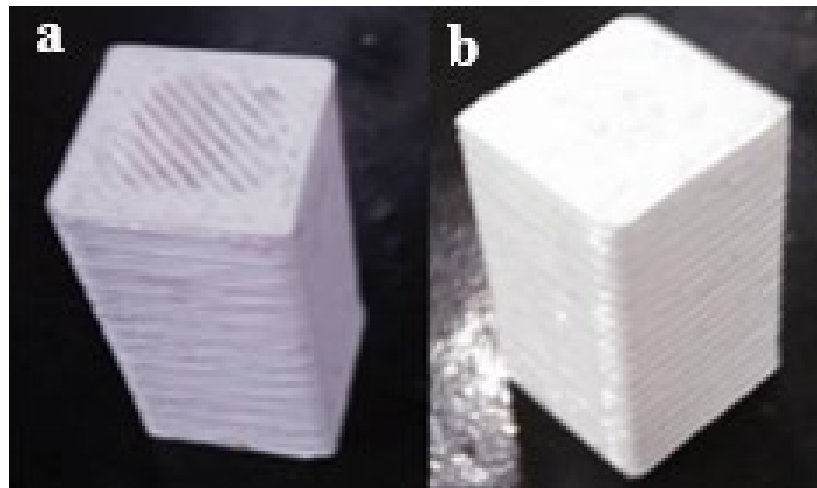
A superfície inferior das amostras, a qual ficou em contato com a bandeja de deposição, apresentou aspecto consideravelmente mais liso, enquanto a superfície superior (últimas camadas depositadas) exibiu maior quantidade de irregularidades.

O tempo de impressão de cada amostra variou ente 12 e 16 minutos para as amostras com 10% de preenchimento, e entre 20 e 23 minutos para as com 90%, tanto para as amostras do ensaio de compressão quanto para o do de impacto. A remoção das peças da bandeja de deposição foi realizada com o auxílio de espátula após o resfriamento da impressora.

Observando as amostras lateralmente (visão perpendicular ao sentido de impressão), foi possível visualizar o empilhamento das camadas de impressão, característico da técnica FDM. As camadas exteriores, vistas lateralmente a olho nu, estavam completamente unidas para ambos os preenchimentos de 10% e 90%, indicando que a porosidade se dá apenas no interior das peças produzidas, de forma a não afetar o aspecto estético final, mas influenciando, contudo, as propriedades de cada tipo de amostra.

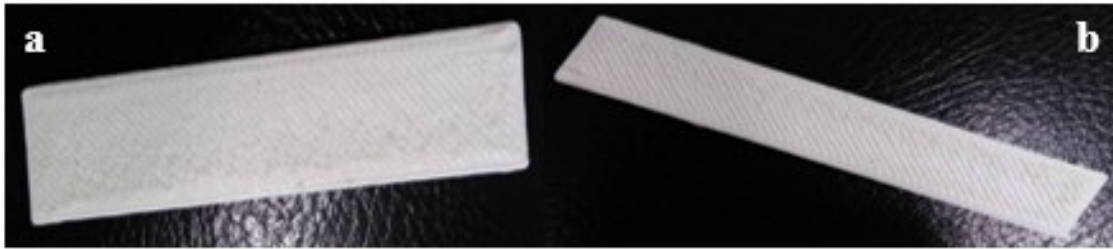
As Figuras 9 e 10 ilustram as amostras obtidas com a impressão 3D via técnica de FDM para preenchimentos de 10 e 90, para utilização em ensaios de compressão e impacto.

Figura 9 – Amostras (a) ABS10C; (b) ABS90C.



Fonte: Autor.

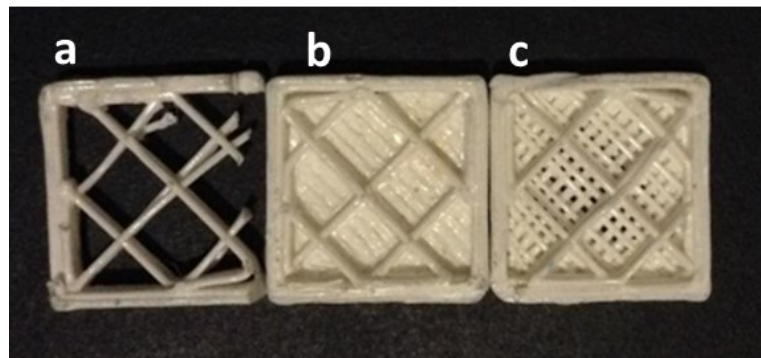
Figura 10 – Amostras (a) ABS10I; (b) ABS90I.



Fonte: Autor.

As Figuras 11 e 12 mostram a estrutura interior obtida para amostras ABS10C e ABS90C.

Figura 11 – Vista do interior de uma amostra ABS10C, após corte com lâmina metálica: (a) parte central da amostra; (b) base em contato com a mesa de deposição; (c) topo.



Fonte: Autor.

Figura 12 – Vista do interior de uma amostra ABS90C, após corte com lâmina metálica.



Fonte: Autor.

A vista do interior da amostra permitiu observar nitidamente as diferenças no tipo de deposição realizado pela impressora para preenchimentos de 10% e de 90%. O preenchimento de 90% resultou em bloco com aspecto sólido, no qual apesar de ser possível notar o sentido retilíneo de deposição, não é possível separar a olho nu cada passe dado, ou seja, o caminho percorrido pelo *nozzle*. Na amostra com 10% de preenchimento, por outro lado, percebe-se que a impressora criou um entrelaçado interior, que atua como suporte para as camadas exteriores.

Os valores de densidade aparente obtidos para cada preenchimento são apresentados na Tabela 06. A massa média das amostras ABS10I foi de $1,978\text{g} \pm 0,43\%$ e das ABS90I $2,412\text{g} \pm 0,40\%$. O volume considerado foi de $2,60\text{ cm}^3$ para todas as amostras.

Tabela 6 – Densidade aparente das amostras ABS10I e ABS90I.

Amostra	Densidade (g/cm^3)
ABS10I	0,76
ABS90I	0,93

Fonte: Autor

Observando as massas depositadas e as densidades aparentes calculadas, tem-se que o preenchimento de 90% implica em cerca de 18% a mais de material sendo depositado na estrutura. A densidade do ABS descrita na literatura está entre $1,01$ e $1,09\text{ g}/\text{cm}^3$ (HIRAYAMA, 2015). Comparando tais valores, percebe-se que mesmo a amostra com 90% de preenchimento, a qual vista macroscopicamente possui aspecto completamente sólido, possui vazios na sua estrutura.

Comparando-se os valores de densidade aparente obtidos na impressão 3D com os valores de materiais tradicionais utilizados em embalagens (ver Tabela 1), observa-se um ganho em relação ao aço, o qual possui densidade $7,86\text{ g}/\text{cm}^3$, e ao PEAD, com densidade $0,95\text{ g}/\text{cm}^3$, para ambos os preenchimentos (10 e 90%). Já com relação ao PP, com densidade $0,88\text{ g}/\text{cm}^3$, o ganho aparece apenas para a amostra com menor preenchimento.

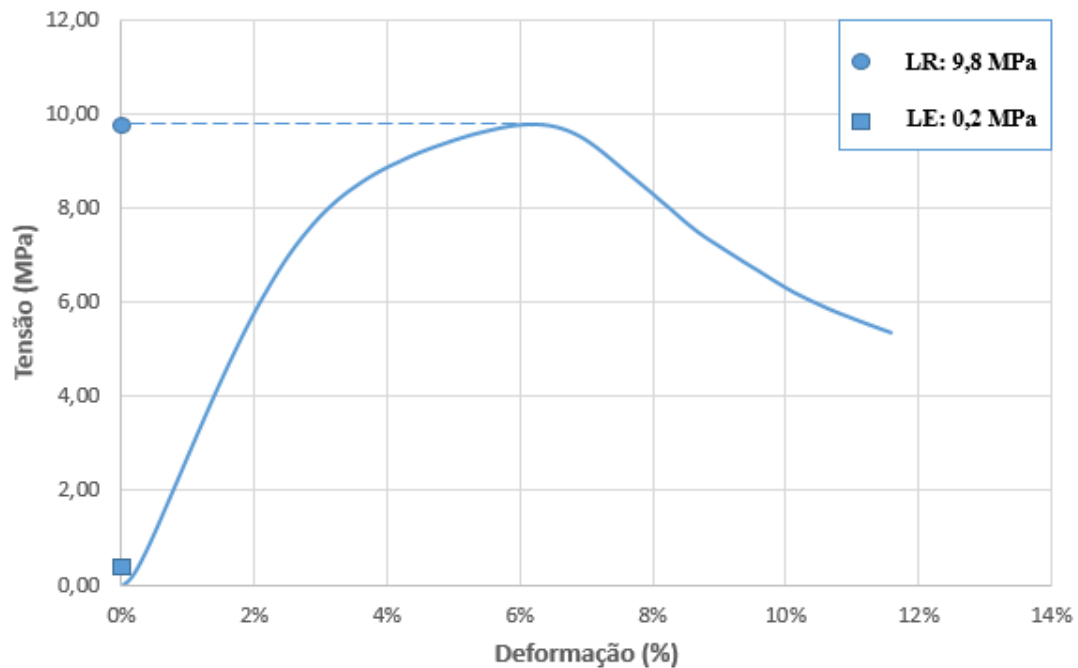
Em termos de aplicação em embalagens para peças automotivas, a massa da embalagem é fator de extrema relevância. Maiores massas da embalagem resultam em maiores massas do conjunto a ser transportado, exigindo veículos de transporte com maior capacidade carga, necessidade de maior mecanização para movimentação das embalagens, empilhadeiras mais

potentes, etc. Assim, as estruturas poliméricas possuem essa vantagem com relação às metálicas, no caso o aço, e entre os materiais poliméricos estudados, o ABS10 aparenta ser o mais promissor.

4.3 Ensaio Mecânico de Compressão

Os gráficos das Figuras 13 e 14 ilustram o comportamento das amostras ABS10C e ABS90C durante o ensaio de compressão.

Figura 13 – Curva de tensão x deformação para ABS10C.



Fonte: Autor.

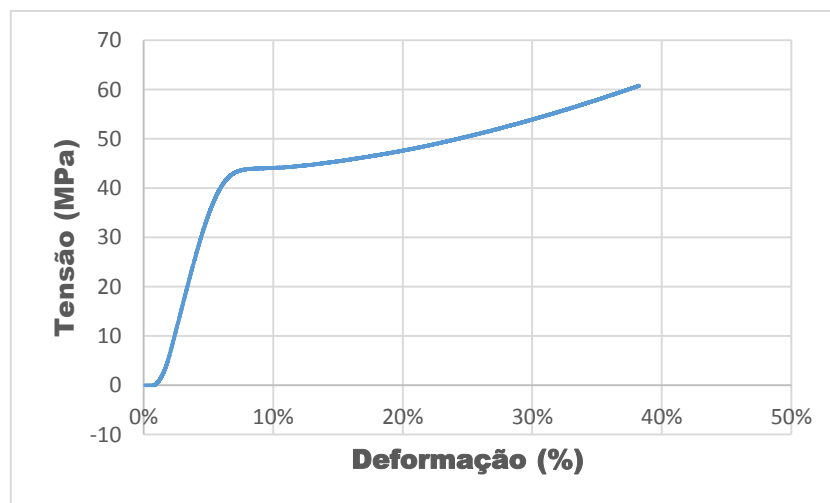
Para as amostras de ABS10C, o patamar de escoamento, ou seja, o ponto no qual se inicia a deformação plástica, não é claramente definido graficamente. Assim, considerou-se o limite de escoamento como o valor de tensão referente à deformação de 0,2% (limite de escoamento convencional). O limite de resistência mecânica, por sua vez, foi determinado como o ponto máximo de tensão, ou seja, o maior valor de tensão suportado pelo material antes que ocorra o comprometimento da integridade estrutural do mesmo. Os valores de limite de escoamento e resistência são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Propriedades do ABS10C obtidas com ensaio de compressão.

Propriedade	Valor	Desvio Padrão
Limite de Resistência	9,8 MPa	0,2 MPa (2%)
Limite de escoamento	0,2 MPa	0,08 MPa (30%)

Fonte: Autor.

Percebe-se que o limite de escoamento está associado a um erro padrão bastante elevada, o que pode ser relacionado com a definição não clara, mesmo em termos gráficos, do patamar de escoamento. Com relação ao limite de resistência, o valor encontrado para 10% de preenchimento é de $9,8 \pm 0,2$ MPa, enquanto o valor do ABS em estrutura completamente sólida é de 65 MPa. Logo, a perda foi de cerca de 85% na resistência à compressão. Com relação aos PP e ao PEAD, os quais possuem limites de resistência de 40 e 20 MPa respectivamente, as perdas foram de aproximadamente 75% e 50% (MAT WEB, 2016). Sabe-se que ensaios de compressão não são comumente realizados com materiais metálicos, pois devido à ductilidade dos mesmos, o ponto de fratura em compressão não é tão claro (IMPRESS, 2016). O limite de resistência à tração, contudo, encontra-se próximo a 380 MPa, conforme apresentado na Tabela 1. Observando apenas as ordens de grandeza dos materiais apenas, fica clara a maior resistência do aço 1020.

Figura 14 – Curva de tensão x deformação para ABS90C.

Fonte: Autor.

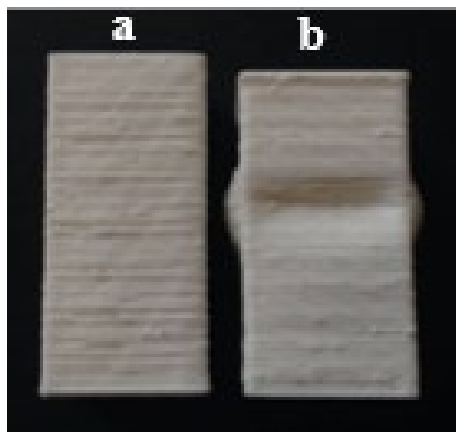
Para as amostras de ABS90C, o limite de operação da máquina (9.800N) foi atingido antes que a amostra chegasse ao seu limite de resistência mecânica (LRM). Dessa forma, o ensaio foi interrompido antes de se atingir a tensão máxima suportada pelo material. Apenas uma amostra ABS90C foi submetida ao ensaio, devido às limitações da máquina.

O que se pode afirmar é que o limite de resistência é maior do que 60MPa, e que nessa tensão, o material já havia se deformado em cerca de 38%. O que se nota, comparando os valores obtidos para 10% e 90% de preenchimento, é que existem valores de preenchimento intermediários os quais serão capazes de fornecer ao material fabricado a resistência à compressão necessária, seja ela equiparada à do PP, do PEAD, conforme necessidade de aplicação.

Pensando na utilização do ABS impresso via FDM como embalagem retornável, sabe-se que existe uma imensa variedade de produtos a serem transportados, os quais exigirão do material utilizado na embalagem requisitos diferentes em termos de resistência à compressão. Assim, enquanto para determinadas peças de maior massa, como por exemplo motores, o aço possa ser o material mais indicado, para outras de menor massa, que exijam maior integridade estrutural da embalagem do que o PP e o PEAD podem oferecer, o ABS aparece como forte candidato.

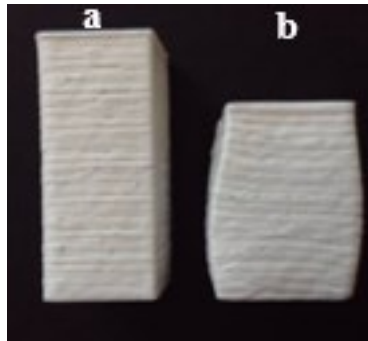
Os aspectos dos corpos de prova, antes e após serem retirados da máquina de ensaio, são apresentados nas Figura 15 e 16.

Figura 15 – Corpos de prova de ABS10C (a) antes e (b) após o ensaio de compressão.



Fonte: Autor.

Figura 16– Corpos de prova de ABS90C (a) antes e (b) após o ensaio de compressão.



Fonte: Autor.

Pode-se perceber comportamentos bastante diferentes para cada tipo de amostra após o ensaio de compressão. A amostra de ABS90C apresenta aspecto de barril, o qual é uma consequência do atrito existente entre as superfícies da máquina de ensaio e do corpo de prova, causador de deformação plástica, e é uma característica mais comumente vista para materiais dúcteis. A mudança nas dimensões do corpo de prova foi bastante acentuada, quando comparada com as da amostra ABS10C, o que indica mais deformação plástica.

No caso da amostra de ABS10C, também se observa deformação plástica. A estrutura, contudo, por conter grande volume de espaços vazios, se rompeu muito mais rapidamente e não adquiriu o aspecto de barril.

4.4 Ensaio Mecânico de Impacto Izod

Os resultados obtidos com o ensaio impacto nas amostras ABS10I e ABS90I são apresentados nas Tabelas 8 e 9.

Tabela 8 – Resultados de Energia Absorvida (J) obtidos no ensaio de impacto Izod para corpos de prova com preenchimento de 10 e 90%.

Energia Absorvida (J)	10%	90%
Média (J)	0.60	0.72
Desvio Padrão (J)	0.04	0.11
Desvio Padrão (%)	6%	15%

Fonte: Autor.

Tabela 9 – Resultados de Resistência ao Impacto (J/m^2) obtidos no ensaio de impacto Izod para corpos de prova com preenchimento de 10 e 90%.

Resistência ao Impacto (J/m^2)	10%	90%
Média (J)	14.54	16.95
Desvio Padrão (J)	1.02	2.60
Desvio Padrão (%)	7%	15%

Fonte: Autor.

De maneira geral, sabe-se que a energia total absorvida pelo material diminui com o aumento da porosidade e com formatos irregulares de poros, devido a diminuição da área útil resistente e ao efeito de entalhe dos poros, concentradores internos de tensão. (QUINAN; PALMA, 1999). O que se observa, contudo, é que estatisticamente falando, não se pode falar em diferença significativa de energia absorvida para as amostras ABS10I e ABS90I, visto que os intervalos de resultado \pm desvio padrão para os conjuntos de amostras se sobrepõem.

A conclusão que se chega, portanto, é que vazios na estrutura com 10% de preenchimento não estão funcionando como concentradores de tensão, mas sim como dissipadores de energia, os quais contribuem para a não-propagação da trinca.

Retomando as análises de densidade aparente e massa feitas na seção 4.2 para as amostras de impacto, percebe-se que a estrutura de impressão 3D criada resultou em uma amostra de ABS10I com 18% a menos de massa e resistência ao impacto similar às amostras ABS90I. Do ponto de vista de aplicações, em especial como uso em embalagens retornáveis, é extremamente interessante que se consiga uma redução significativa na massa empregada, sem perdas estatisticamente relevantes na resistência ao impacto.

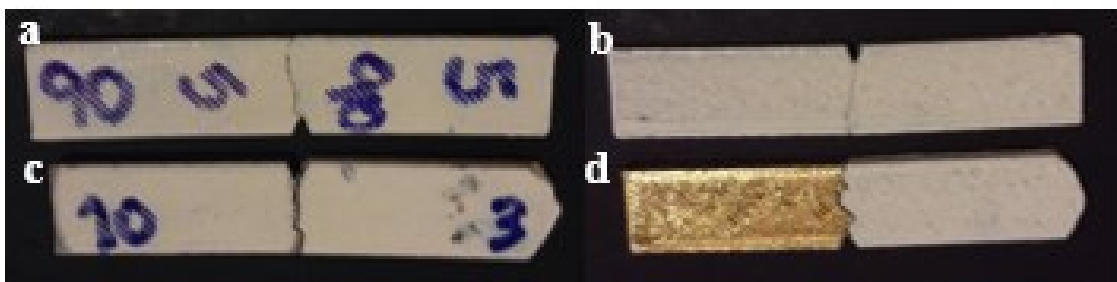
O valor de energia obtido com o ensaio é um valor relativo e comparativo entre resultados obtidos nas mesmas condições de ensaio, ou seja, considerando a mesma temperatura, o mesmo tipo de entalhe, a mesma máquina, o mesmo martelo, etc. Assim, o mesmo é uma comparação eficiente entre as amostras de ABS10I e ABS90I, feitas na mesma condição. Contudo, é difícil comparar os resultados obtidos no ensaio feito para o presente trabalho com valores da literatura.

Conforme foi apresentado na Tabela 1, sabe-se que o PP possui resistência ao impacto de cerca de 25 J/m, enquanto o PEAD está próximo de 140 J/m. Para aços, a energia absorvida no impacto varia na faixa entre 35 a 200J dependendo dos tratamentos térmicos aplicados

(normalização, recozimento, etc.), do tamanho do grão e do processamento mecânico. No caso do ABS, valores de 411J/m são apresentados (CURBELL PLASTICS, 2016), ilustrando esta que é das principais características do ABS, a resistência ao impacto elevada.

O aspecto de fratura, a nível macroscópico, obtido com o ensaio é apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Amostras de (a, b) ABS10I e (c, d) ABS90I após o ensaio de impacto, vistas de ambos os lados.



Fonte: Autor.

Tanto para as amostras impressas com preenchimento de 10% quanto para as com preenchimento de 90%, o que se observa é que as metades de cada corpo de prova podem ser “encaixadas”. Tal observação indica a ocorrência de pouca deformação plástica durante o processo de fratura causado pelo ensaio de impacto. A pequena deformação plástica na região da fratura é indicativo de fratura frágil.

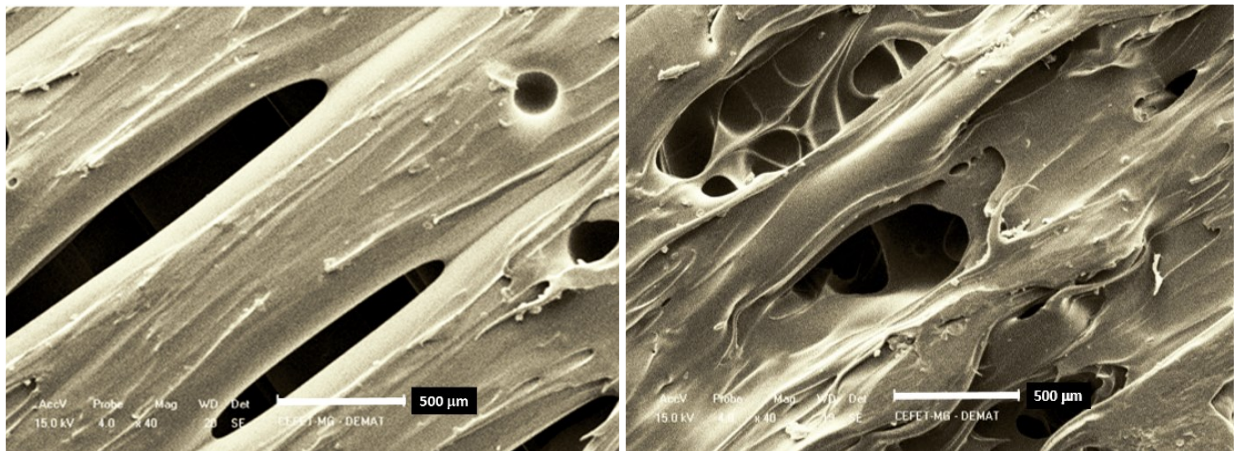
A princípio, pensando na aplicação do ABS como material para fabricação de embalagens retornáveis, a fratura frágil não é interessante. Caso a embalagem se rompa de forma frágil e abrupta ao sofrer algum impacto durante a movimentação, carregamento ou transporte, o efeito poderia ser drástico para as peças transportadas, para outras embalagens empilhadas, etc.

Contudo, na prática, verifica-se que mesmo materiais tipicamente dúcteis podem se romper de maneira frágil, ou seja, sem deformação plástica apreciável. Tal fenômeno é observado em geral quando há presença de trinca ou entalhe e quando a velocidade de carregamento é suficientemente alta (RODRIGUES). Logo, pode-se inferir que o ensaio de impacto em si, gera uma condição favorável ao desenvolvimento de fratura frágil.

4.5 Microscopia Eletrônica de Transmissão (MEV)

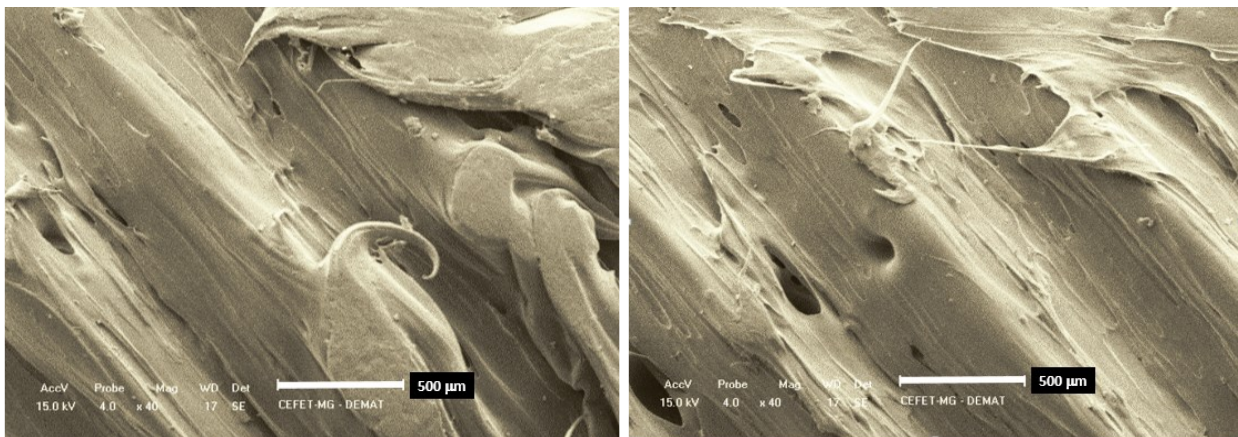
As Figuras 18 e 19 apresentam as estruturas obtidas com a impressão 3D por técnica FDM, com aumento de 40 vezes, para preenchimentos de 10 e 90%, com as amostras analisadas em vista superior (direção paralela à de deposição, eixo z).

Figura 18 – Vista superior da amostra ABS10.



Fonte: Autor.

Figura 19 – Vista superior da amostra ABS90.



Fonte: Autor.

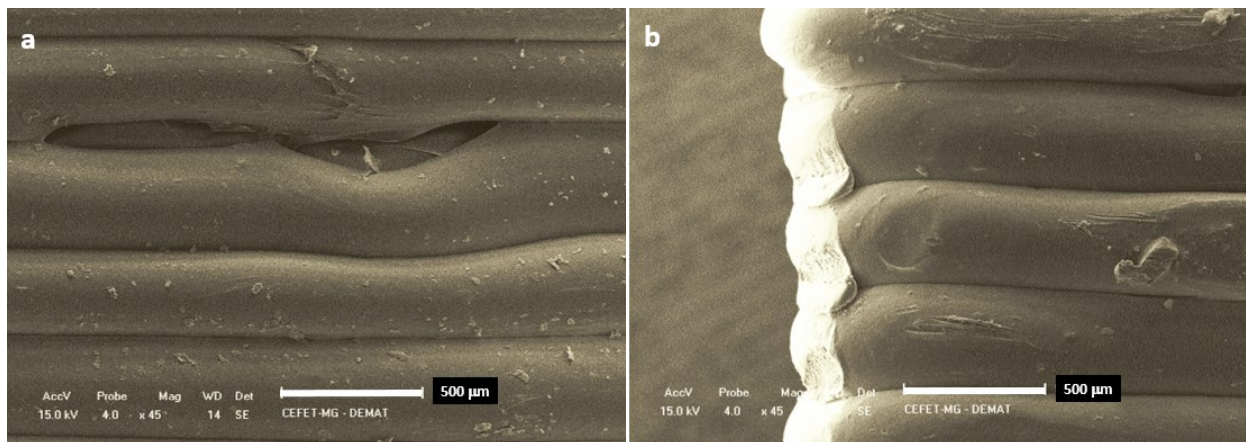
As Figuras 18 e 19 obtidas com o MEV mostram de forma clara o sentido de deposição do material, ou seja, o caminho percorrido pelo *nozzle* da impressora. Percebe-se que as superfícies de material depositadas apresentam acabamento irregular e rugosidade elevada. Tal

comportamento é esperado para um processo de fabricação no qual o material é depositado na plataforma da impressora em temperatura alta, relativamente próxima do seu ponto de fusão. A alta temperatura necessária ao processo de extrusão permite que o material seja depositado em um estado amolecido, no qual existe possibilidade para micro movimentações e união de material proveniente de diferentes “*passes*”.

Observando a porosidade do material depositado em cada condição, nota-se que amostras ABS10 apresentam maior quantidade e poros em tamanho maior que as amostras ABS90. Na prática, isso significa que a diferença de preenchimento se dá tanto no tipo de estrutura interna construída pela impressora (ilustrado nas Figuras 19 e 20), quanto na quantidade e modo como o material é depositado a nível microestrutural. Além disso, em ambos os casos, os poros apresentam aspecto arredondado ou ovular, confirmando a hipótese de que os mesmos estariam agindo não como concentradores de tensão, mas como dissipadores de energia na estrutura.

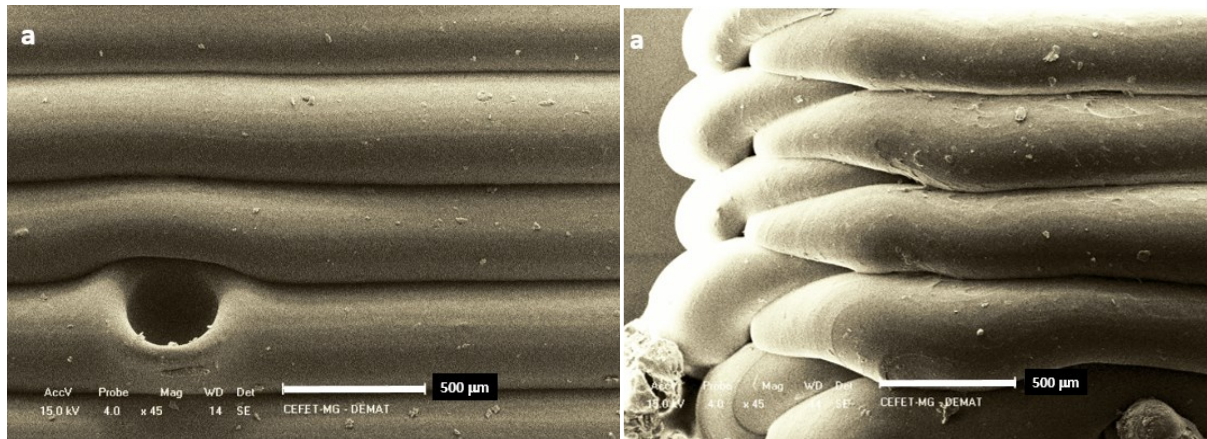
As Figuras 20 e 21 mostram a vista lateral das amostras ABS10 e ABS90 impressas, em sentido perpendicular à direção de empilhamento das camadas.

Figura 21 – Amostras de ABS10 em vista da (a) região central e da (b) extremidade.



Fonte: Autor.

Figura 22 – Amostras de ABS90 em vista da (a) região central e da (b) extremidade.

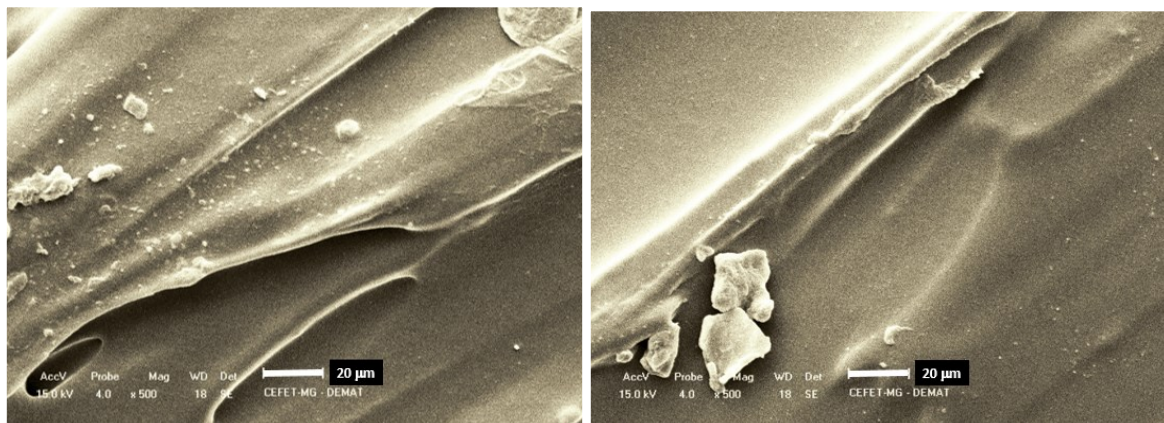


Fonte: Autor.

As imagens mostram com clareza o empilhamento das camadas obtido com a impressão 3D. É interessante observar que o número de camadas depositadas para as amostras ABS10 e ABS90 é aproximadamente o mesmo. Além disso, percebe-se poros em ambos os casos, indicando que independentemente da quantidade de preenchimento escolhida, é inerente à técnica a formação de defeitos. Para o ABS10 a parede externa apresenta aspecto mais liso. Tal observação é coerente com o fato que para o ABS90, mais material adjacente às camadas externas é depositado, gerando mais pressão sobre as mesmas.

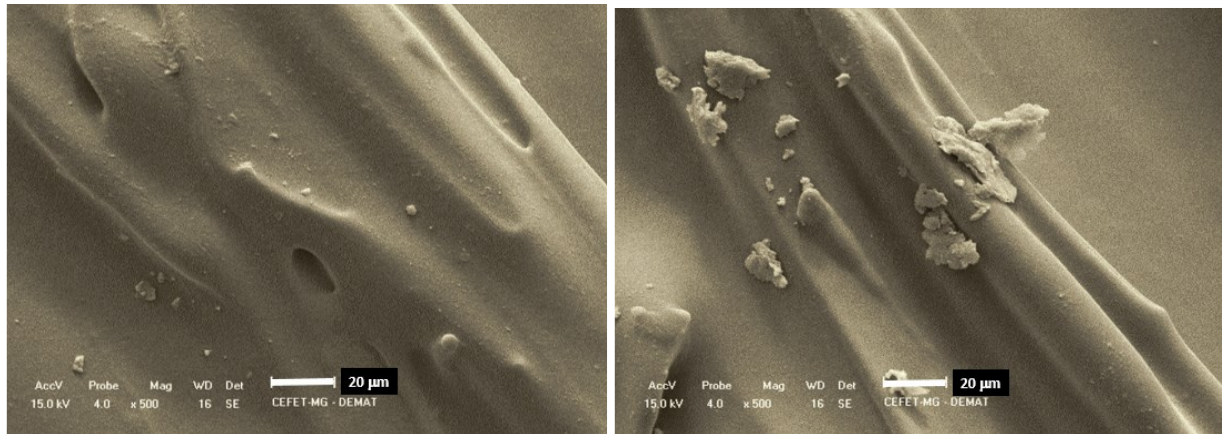
As Figuras 23 e 24 trabalham com ampliações maiores, de 500 vezes, para amostras de ABS10 e ABS90 em vista superior.

Figura 23 – Vista superior de amostras de ABS10.



Fonte: Autor.

Figura 24 – Vista superior de amostras de ABS90.



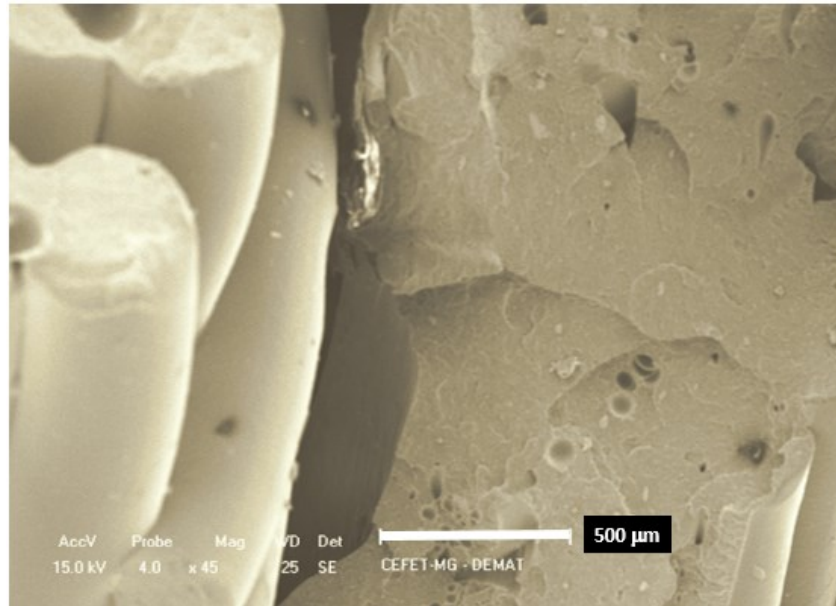
Fonte: Autor.

É interessante observar que mesmo ampliações maiores ainda revelam presença de poros tanto para o ABS10 quanto para o ABS90, o que indica que a presença dos mesmos é inerente à técnica de impressão FDM com o ABS. Percebe-se também que o tamanho dos poros está presente em uma faixa de bastante longa (poros entre 5 e 10 μm vistos com ampliação de 500 vezes e poros entre 500 e 100 μm vistos com ampliação de 45 vezes).

A ampliação de 500 vezes mostra aglomerados de ABS com tamanhos entre 5 e 20 μm , para ambos os preenchimentos considerados, os quais podem representar as irregularidades pontuais que se vê em ampliações menores. Não se acredita que os aglomerados representem as inclusões de polibutadieno na matriz SAN, característica do ABS. Em trabalhos com o ABS evidenciando a estrutura matriz/inclusões, os aumentos utilizados estiveram entre 1000 e 5000 vezes, e as inclusões apresentavam formato esférico (PORCEL, 2004).

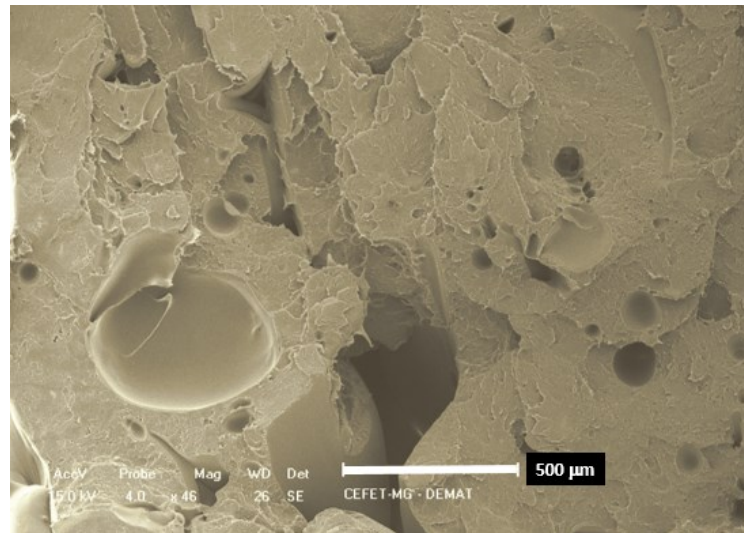
As Figuras 25 e 26 apresentam imagens específicas da região da fratura das amostras de ABS10I e ABS90I, após o ensaio de impacto.

Figura 25 – Região da fratura de amostra ABS10I vista no MEV.



Fonte: Autor.

Figura 26 – Região da fratura de amostra ABS90I vista no MEV.

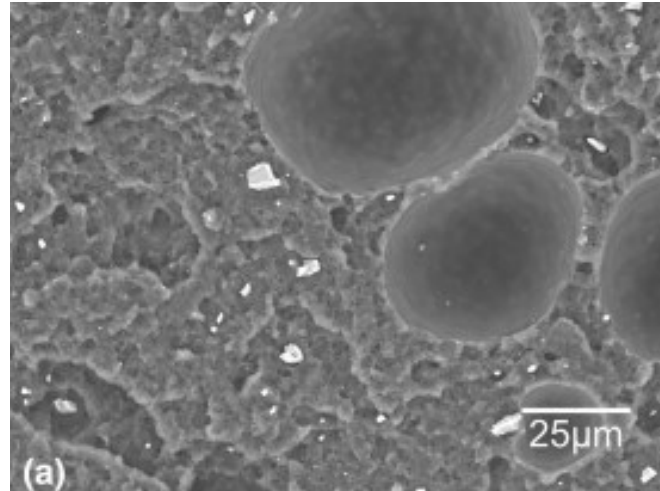


Fonte: Autor.

Comparando as imagens do ABS10I com as do ABS90I, pode-se inferir que ocorreu mais deformação plástica no material com 90% de preenchimento, visto que há maior presença de planos de deformação. É complexo diferenciar as cavidades inerentes à estrutura porosa do material de possíveis *dimples*. Resultados similares foram encontrados em outros trabalhos, como

é o caso da Figura 27, no qual a fratura foi definida como frágil (PEREZ; ROBERSON; WICKER, 2014).

Figura 27 – Região da fratura causada por ensaio de tração em ABS.



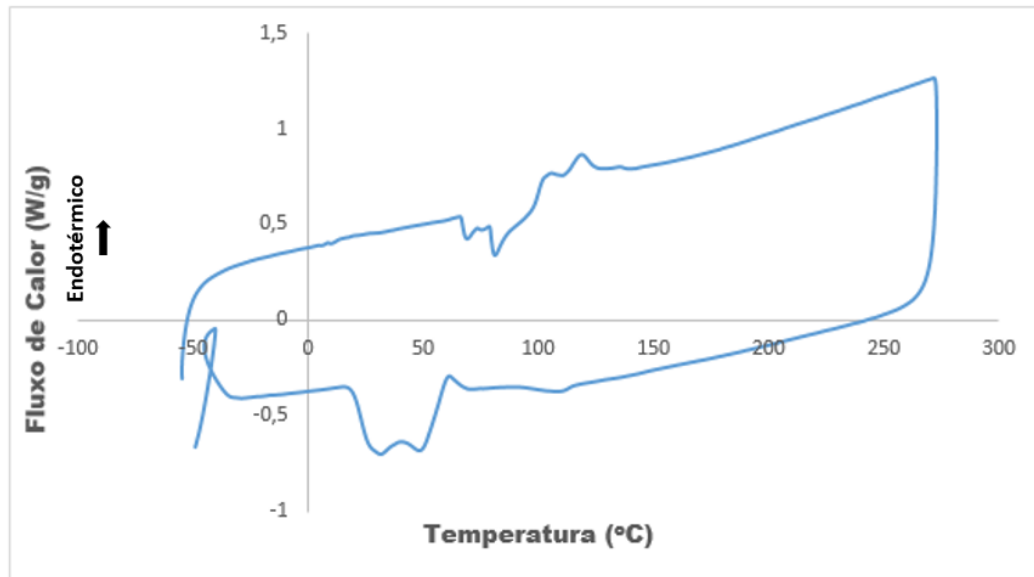
Fonte: PEREZ; ROBERSON; WICKER, 2014.

A expectativa de fratura frágil para o ensaio de impacto já existia, conforme discutido anteriormente. Sabe-se que o comportamento frágil/dúctil, na prática, pode ser alterado com adição de fibras e/ou partículas cerâmicas, conforme necessidade de aplicação (PEREZ; ROBERSON; WICKER, 2014).

4.6 Calorimetria Exploratória de Varredura (DSC)

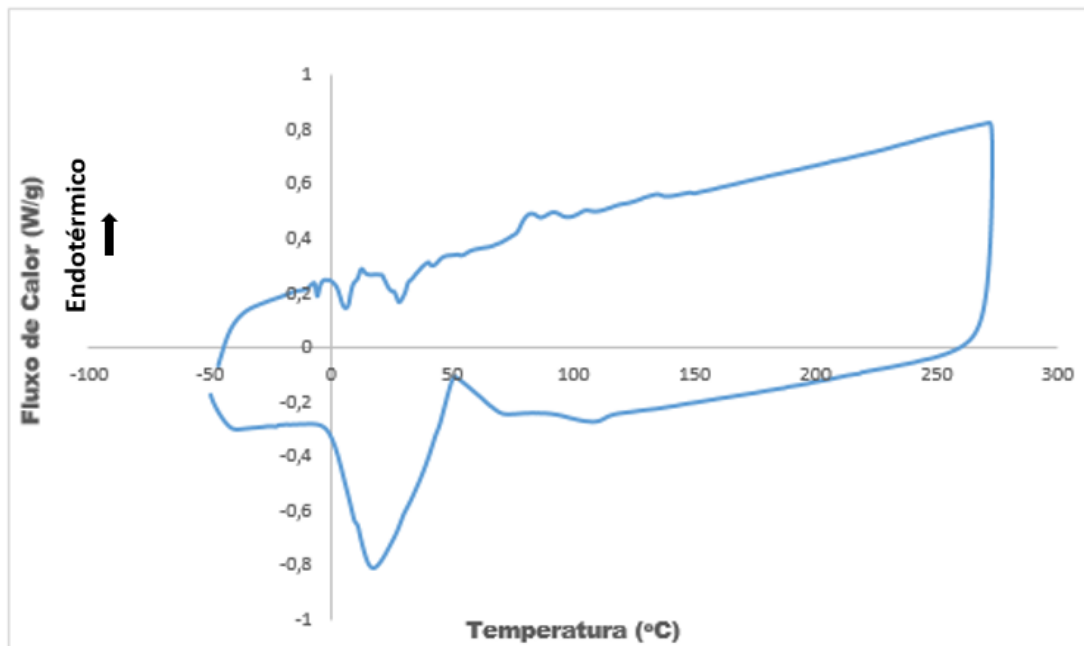
Os gráficos das Figuras 28 e 29 ilustram o comportamento térmico do ABS para uma amostra de filamento antes da impressão e para uma amostra após a passagem pela fusão e extrusão na impressora, respectivamente.

Figura 28 – Curva DSC para filamento de ABS antes da impressão.



Fonte: Autor.

Figura 29 – Curva DSC para ABS após a impressão.



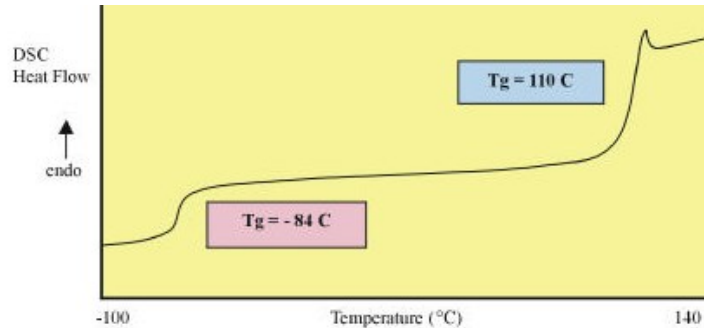
Fonte: Autor.

As curvas obtidas com o DSC não condizem com o esperado para o ABS, o qual é um polímero amorfo. Os picos observados na parte inferior dos gráficos indicam ocorrência de

cristalização. Na parte superior, os picos indicam fusão de parte cristalina e não evidenciam de forma clara a transição vítrea esperada para o material em torno de 109°C (HIRAYAMA, 2015).

A Figura 30, mostra uma típica curva esperada para o ABS em análise de Calorimetria Exploratória de Varredura.

Figura 30 – Curva típica do ABS no ensaio DSC.



Fonte: SICHINA, 2000.

As diferenças observadas possuem várias explicações plausíveis, contudo, uma inferência mais assertiva requer a realização de análises térmicas e químicas mais precisas para o material. Algumas hipóteses com as quais se pode trabalhar é a do efeito de aditivos adicionados ao ABS, tanto para garantir a processabilidade e prevenir a degradação, quanto para alterar aspectos estéticos, como a cor do material impresso.

Um ponto a se ressaltar é que é possível observar que o material passa por mudanças estruturais ao ser impresso, ou seja, fundido e extrudado. Tal fenômeno é evidenciado pelo desaparecimento de alguns picos, ao se comparar as Figuras 28 e 29 e a fusão de outros.

5 CONCLUSÃO

Visando comparar as propriedades do ABS impresso através da técnica de Moldagem por Fusão e Deposição (FDM), foram fabricadas amostras com duas porcentagens de preenchimento interno: 10% e 90%, sendo a caracterização feita para ambas as condições. O projeto das peças a serem impressas foi feito no software Solid Woks.

As amostras construídas foram caracterizadas mecanicamente com ensaio de compressão e tração, os quais representam os principais esforços aos quais uma embalagem retornável está sujeita. A compressão associada ao peso das peças embaladas e ao empilhamento, e o impacto relacionado a operações de carga, descarga e movimentação no transporte.

O ensaio mecânico de compressão indicou uma resistência mecânica de em média 10 MPa para o preenchimento de 10% e de mais que 60 MPa (ensaio foi interrompido devido a limitações de carga na máquina) para o preenchimento de 90%. O resultado mostra a versatilidade do ABS, o qual pode ser produzido com estrutura mais ou menos porosa, de acordo com o tipo de peça a ser carregado na embalagem e com a necessidade de empilhamento, de forma a atender o projeto.

Para o ensaio de impacto, chegou-se em valores de resistência ao impacto e energia absorvida similares para o preenchimento de 10 e 90, o que mostra que os vazios e poros na estrutura não atuam como concentradores de tensão, mas sim contribuem na dissipação de energia. Considerando que o impacto é um dos principais esforços aos quais o material está submetido durante operações de carga, descarga e movimentação no transporte, e que o ABS é conhecido por possuir resistência ao impacto elevada, quando comparado ao PP e ao PEAD, por exemplo, a possibilidade de se fazer um material com menor massa e resistência equivalente é bastante promissora.

Foram realizadas análises a níveis macro e microestruturais da região da fratura do ensaio de impacto. A nível macro, a pequena deformação plástica indica fratura do tipo frágil, resultado esperado para o impacto, no qual a presença de entalhe e a velocidade de carregamento tendem a contribuir para o comportamento frágil. As imagens de MEV obtidas são condizentes com resultados obtidos por outros autores em experimentos semelhantes.

A análise com MEV também demonstrou que as diferenças entre o preenchimento de 10 e 90% encontram-se não só na estrutura macro criada pela impressora, como também na quantidade de poros e vazios presentes. Os poros possuem aspecto arredondado e ovalado,

confirmando a hipótese que os mesmos contribuem para a dissipação de energia no material e aumentam a resistência ao impacto.

A análise DSC trouxe resultados diferentes dos esperados para um material tipicamente amorfo, sendo necessárias análises químicas e térmicas mais precisas para determinar as causas. Fica evidenciado, contudo, o impacto do processo de impressão na estrutura do material, visto que as curvas obtidas para o filamento antes e após o processamento apresentam diferenças significativas.

Conclui-se, portanto, que o ABS é uma opção viável para uso em embalagens retornáveis em fluxos de logística reversa na indústria automobilística, visto que suas propriedades atendem os requisitos da aplicação. A técnica de fabricação estudada, impressão 3D via moldagem por fusão e deposição (FDM), acrescenta a possibilidade de se produzir estruturas customizadas com relação ao preenchimento e aos detalhes necessários. Como investimento, a impressora ainda apresenta custo de equipamento mais baixo que injetoras e extrusoras tradicionais, e não requer uso de molde, o que torna o método uma possibilidade imaginável para um futuro próximo.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. **Embalagem Retornável Entre Parceiros de Negócios: Melhores Práticas**, v.02, 2012. Disponível em: < <http://www.anfavea.com.br/documentos/MelhoresPraticas.fev.2012.pdf> >. Acesso em: 20 nov. 2016.
- AZEVEZO, F. M. **Estudo e projeto de melhoria em máquina de impressão 3D**. 2013. 48f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013. Disponível em: < http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180450/tce-16012014-152931/publico/Azevedo_Fabio_Mariotto.pdf >. Acesso em: 7 nov. 2016.
- BHASIN, V.; BODLA, M. R. **Impact of 3D printing on global supply chains by 2020**. 2014. 150 p. Tese (Mestrado)- Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 2014. Disponível em: <<https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/92106#files-area>>. Acesso em: 21 nov. 2016.
- BORCHART, M. et al. **Considerações sobre ecodesign: um estudo de caso na indústria eletrônica automotiva**. Ambiente & Sociedade, Campinas, v. XI, n. 2, p. 341-355, dez. 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/asoc/v11n2/v11n2a09.pdf>>. Acesso em: 07 nov. 2016.
- BRASKEM. **Consulta de produtos**. Disponível em: <<http://lojapiramidal.com.br/fabricante/4-braskem.aspx>>. Acesso em: 26 nov. 2016.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5^a ed., Editora LTC, 2002.
- CÂNDIDO, L. H. A. **Estudo do ciclo de reciclagem de materiais em blendas acrilonitrila-butadieno-estireno / policarbonato**. 2011. 129 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Campinas, 2011. Disponível em: < http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/32618?locale=pt_BR >. Acesso em: 07 nov. 2016.

CASTRO, M. A. S. **Prevenção da poluição aplicada às embalagens de uso industrial**. 2005. 140 p. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade Federal de São Paulo, São Carlos, 2005. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde.../marcoascastro_p2pack.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2016.

COUTINHO, F. M. B.; MELLO, I. L.; SANTA MARIA, L. C. Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, [S.l.], v. 13, n. 1, p. 1-13, jan. 2013. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/po/v13n1/15064.pdf>>. Acesso em: 26 nov. 2016.

FREIRE, E.; MONTEIRO, E. E. C.; CYRINO, J. C. R. Propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno com fibra de vidro. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, [S.l.], p. 01-10, set. 1994. Disponível em: <<http://www.revistapolimeros.org.br/PDF/v4n3/v4n3a02.pdf>>. Acesso em: 26 nov. 2016.

CURBELL PLASTICS. **Material Selection Guideline**, 2016. Disponível em: <<https://www.curbellplastics.com/Research-Solutions/Technical-Resources/Technical-Resources/Plastic-Material-Selection-Guide>>. Acesso: 27 nov. 2016.

DESIGN TECH. **Technologies in 3D Printing**. Disponível em: <<https://www.designtechsys.com/articles/3d-printing-technologies.php>>. Acesso em: 23 nov. 2016.

GALDEANO, J. A. L. **3D Printing food: the sustainable future**. 2015. 104 p. Tese (Mestrado) - Kaunas University of Technology, Kaunas, 2015. Disponível em: <<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/26399/Mater%20Thesis.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2016.

GARCIA, L. H. T. **Desenvolvimento e fabricação de uma mini-impressora 3D para cerâmicas**. 2010. 105 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Paulo, São Carlos, 2010. Disponível em:

<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18146/tde.../LuisHilarioToblerGarcia.pdf>>. Acesso em: 7 nov. 2016.

HGS, LOGISTIC MARKET. **Informação detalhada do produto Rack**. Disponível em: <<https://www.logismarket.ind.br/hgs-maquinas/rack/2526597095-1179619045-p.html>>. Acesso em: 20 nov. 2016.

HIRAYAMA, D. **Reciclagem do copolímero acrilonitrila-butadieno-estireno e do poliestireno de alto impacto oriundos de rejeitos de equipamentos elétricos e eletrônicos na forma de blendas poliméricas**. 2015. 213 p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de Lorena - Universidade Federal de São Paulo, Lorena, 2015. Disponível em: <<http://www.ppgem.eel.usp.br/system/files/arquivos/teses/Tese%20-%20Denise%20Hirayama.pdf>>. Acesso em: 7 nov. 2016.

KUREK, A. P. **Avaliação da redução e substituição do ácido crômico na etapa de condicionamento químico de peças em ABS**. 110 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade da Região de Joinville – Univille, Joinville, 2008. Disponível em: <<http://univille.edu.br/account/mep/VirtualDisk.html?action=readFile&file...Ana...>>. Acesso em: 7 nov. 2016.

LEITE, Paulo Roberto. **Logística Reversa: meio ambiente e competitividade**. 1^a. ed. São Paulo, 2003.

LIMA, L. M. **Viabilidade econômica de diferentes tipos de embalagens para laranja de mesa: um estudo de multicasos no estado de São Paulo**. 2003. 143 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003. Disponível em: <<http://www.fesalqlog.esalq.usp.br/wp-content/uploads/2015/05/Viabilidade-econ%20mica-de-diferentes-tipos-de-embalagens-para-laranja-de-mesa-um-estudo-de-multicasos-no-Estado-de-S%20Paulo.pdf&usg=AFQjCNG7yFHDZfbSO9E3RWwc24vyOe-EEQ>>. Acesso em: 7 nov. 2016.

MACHLINE, C. Cinco décadas de logística empresarial e administração da cadeia de suprimentos no Brasil. **RAE**, São Paulo, v. 51, n. 3, p. 227-231, jun. 2011. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rae/v51n3/v51n3a03.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2016.

MAIA, M. D. S. **Classificação de prestadores de serviços logísticos: o caso da empresa XYZ Logística Ltda.**. 2009. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br> > ... > Ciências Sociais Aplicadas>. Acesso em: 20 set. 2016.

MENEZES, T. S. **Planejamento logístico como ferramenta para o aprimoramento do nível de serviço: um estudo de caso em uma empresa do ramo atacadista na cidade de Cruz das Almas - BA.** 2012. 21 f. Especialização em Logística Empresarial (Latu Senso) - Faculdade Adventista da Bahia, Cachoeira, 2012. Disponível em: <http://www.adventista.edu.br/_imagens/pos_graduacao/files/Artigo%20Log%20C3%20ADstica%20-%20Tercio%20Menezes.pdf&usg=AFQjCNHJSImbsFJNg2enrMzrPInXt6kqIQ>. Acesso em: 20 set. 2016.

MONTEIRO, M. T. F. **Impressão 3D no meio produtivo e o design: um estudo na fabricação de jóias.** 2015. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <<http://anapaulanasta.com/wp-content/.../Dissertação-Marco-Túlio-Ferreira-Monteiro.pdf>>. Acesso em: 07 nov. 2016.

MORELLI, D. **Terceirização de sistemas de distribuição física: um estudo de caso em um operador logístico.** 2012. 145 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara D'Oeste, 2012. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2012_TN_STO_157_915_19689.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2016.

MOURA, D. A. **Caracterização e análise de um sistema de coleta programada de peças, "milk run", na indústria automobilística nacional.** 2000. 274 f. Dissertação (Mestrado) -

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3135/tde-29102001-122751/pt-br.php>>. Acesso em: 25 nov. 2016.

NETO, U. J. S.; SANTANA, L. C. Logística e serviço ao cliente como estratégia competitiva. **Revista de Iniciação Científica - RIC**, Cairu, v. 02, n. 02, p. 97-111, jun. 2015. Disponível em: <http://www.cairu.br/riccairu/pdf/artigos/2/07_LOGISTICA_SERVICO_CLIENTE_.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2016.

NUNES, F. L.; ROCHA, M. V.; SELKITTO, M. A. Implantação de embalagens reutilizáveis na indústria automotiva: estudo de caso. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental - REGET**, Santa Maria, v. 18, n. 02, p. 826-834, ago. 2014. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/reget/article/download/13591/pdf>>. Acesso em: 04 nov. 2016.

OSTROUT, N. **Quantifying a Fused Deposition Modeling System's Dimensional Performance Through Its Addressability**. 2015. 130 p. Tese (Mestrado)- Rochester Institute of Technology, Rochester, 2015. Disponível em: <<http://scholarworks.rit.edu/theses/8647/>>. Acesso em: 23 nov. 2016.

PEREZ, A. R. T.; ROBERSON, D. A.; WICKER, R. B. Fracture Surface Analysis of 3D-Printed Tensile Specimens of Novel ABS-Based Materials. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, [S.l.], v. 14, n. 3, p. 343-353, jun. 2014. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007/s11668-014-9803-9>>. Acesso em: 29 nov. 2016.

PINTO, R. J. F. **Injeção e Caracterização do Comportamento Mecânico de Polímeros Termoplásticos: Influência da Pressão de Injeção**. 2012. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto Politécnico de Coimbra, Coimbra, 2012. Disponível em: <http://files.isec.pt/DOCUMENTOS/SERVICOS/BIBLIO/Teses/Tese_Mest_Ricardo-Pinto.pdf>. Acesso em: 04 nov. 2016.

PIRAMIDAL. **Resinas de Engenharia**. Disponível em:

<<http://lojapiramidal.com.br/categoria/57-abs-tairilac.aspx>>. Acesso em: 26 nov. 2016.

PORCEL, Fernanda da Silva. **Influence of processing parameters and composition on the morphology of ABS resins**. 2004. 138 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Exatas e da Terra) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.

PROPLAST. **Caixa Plástica Industrial**. Disponível em: <<http://www.proplast.com.br/caixa-plastica-industrial-349350/>>. Acesso em: 20 nov. 2016.

QUINAN, M. A. D.; LOURENÇO, O. R.; PALMA, E. S. **Influência da porosidade sobre o comportamento de materiais sinterizados por impacto**. In: XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 1999, Águas de Lindóia. Belo Horizonte: [s.n.], 1999. p. 1-10. Disponível em: <<http://www.abcm.org.br/app/webroot/anais/cobem/1999/pdf/AAACGB.pdf>>. Acesso em: 08 nov. 2016.

ROCHA, J. **Fabricação Digital: Processos Aditivos ou “Impressão 3D”**, 2016. Disponível em: < <http://site.designoteca.com/2012/02/02/fabricacao-digital-processos-aditivos-ou-impressao-3d/> >. Acesso em: 22 nov. 2016.

RODA, D. T. **Acrilonitrila-Butadieno-Estireno**, 2014. Disponível em: <<http://www.tudosobreplasticos.com/materiais/abs.asp>>. Acesso em: 26 nov. 2016.

RODRIGUES, L. E. M. J. **Ensaio mecânico de materiais**. Aula 12 – Ensaio de Impacto. 2016. Disponível em: <<http://www.engbrasil.eng.br/pp/em/aula12.pdf>>. Acesso em: 28 nov. 2016.

SAKAI, J. **A importância da logística para a competitividade das empresas: estudo de caso na indústria do polo de Camaçari**. 2005. 225 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2005. Disponível em: <http://www.adm.ufba.br/sites/default/files/publicacao/arquivo/sasaki_dissertacao_final.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2016.

SALMORIA, G. V. et al. In: Anais do 9º Congresso Brasileiro de Polímeros, 2007, Campina Grande. **Prototipagem rápida por impressão 3D com resinas fotocuráveis: uma análise sobre as tecnologias disponíveis no mercado nacional**, 2007. Disponível em: <

https://www.researchgate.net/profile/Gean_Salmoria/publication/266051464_PROTOTIPAGEM_RAPIDA_POR_IMPRESSAO_3D_COM_RESINAS_FOTOCURAVEIS_UMA_ANALISE_SOBRE_AS_TECNOLOGIAS_DISPONIVEIS_NO_MERCADO_NACIONAL/links/5512b4130cf268a4aaead309.pdf>. Acesso em: 07 nov. 2016.

SANTOS, E. **Evolução da cadeia de suprimentos na indústria de produtos e soluções para redes de computadores: estudo de múltiplos casos**. 2008. 262 p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/12/12139/tde-09052008-181615/en.php>>. Acesso em: 20 nov. 2016.

SCANDOLARA, N. L. **Logística como suporte de um modelo para transporte de laminados de madeira**. 2010. 88 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2010. Disponível em:

<http://www.pg.utfpr.edu.br/ppgep/dissertacoes/diss.../NEUDI_LUIS_SCANDOLARA.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2016.

SCHINA, W. J. **DSC as Problem Solving Tool**, 2000. Disponível em: <http://www.perkinelmer.com/Content/applicationnotes/app_thermalcrystallinitythermoplastics.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2016.

STROHAECKER, T. R. **Material de aula: Mecânica da fratura**. 2016. Disponível em: <bizuando.com/material-apoio/icmat/Mecanica_da_Fratura.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2016.

TUDO SOBRE PLÁSTICOS. **Polietileno (PE)**. Disponível em:

<<http://www.tudosobreplasticos.com/materiais/polietileno.asp>>. Acesso em: 26 nov. 2016.