



Universidade de São Paulo  
Escola de Engenharia de São Carlos  
Departamento de Engenharia de Materiais

**CARACTERIZAÇÃO DE ADESÃO EM TECNOLOGIA LOM E  
PROPOSTA DE *MOCK-UP* DE UM SISTEMA DE DEPOSIÇÃO  
APLICADO A UMA IMPRESSORA 3D PORTÁTIL**

Aluno: **Joaquim Manoel Justino Netto**  
Orientadora: Profa. Zilda de Castro Silveira

São Carlos  
2015



Universidade de São Paulo  
Escola de Engenharia de São Carlos

**CARACTERIZAÇÃO DE ADESÃO EM TECNOLOGIA LOM E  
PROPOSTA DE *MOCK-UP* DE UM SISTEMA DE DEPOSIÇÃO  
APLICADO A UMA IMPRESSORA 3D PORTÁTIL**

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado à Escola de  
Engenharia de São Carlos, da  
Universidade de São Paulo,  
como parte dos requisitos para  
obtenção do título de engenheiro  
de materiais e manufatura.

Aluno: **Joaquim Manoel Justino Netto**

Orientadora: Profa. Zilda de Castro Silveira

São Carlos

2015

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

J96c

Justino Netto, Joaquim Manoel

Caracterização de adesão em tecnologia LOM e proposta de mock-up de um sistema de deposição aplicado a uma impressora 3D portátil / Joaquim Manoel Justino Netto; orientadora Zilda de Castro Silveira. São Carlos, 2015.

Monografia (Graduação em Engenharia De Materiais e Manufatura) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2015.

1. Impressão 3D. 2. LOM. 3. Metodologia de Projeto. 4. Mock-up. 5. Tecnologia de Adesivos. I. Título.

## FOLHA DE AVALIAÇÃO

Candidato: **Joaquim Manoel Justino Netto**

Título: **Caracterização da adesão em tecnologia LOM e proposta de *mock-up* de um sistema de deposição aplicado a uma impressora 3-D portátil.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. Curso de Engenharia de Materiais e Manufatura.

### BANCA EXAMINADORA

Profa. Zilda de Castro Silveira (Orientadora)

Instituição: Escola de Engenharia de São Carlos – USP – Departamento de Engenharia Mecânica

Nota Atribuída: \_\_\_\_\_ (        )

Prof. Márcia Cristina Branciforti

Instituição: Escola de Engenharia de São Carlos – USP – Departamento de Engenharia de Materiais

Nota Atribuída: \_\_\_\_\_ (        )

Média: (        )

Resultado:

Data: 8 de Julho de 2015.

Este trabalho tem condições de ser hospedado no Portal Digital da Biblioteca da EESC.

SIM  NÃO  Visto do orientador \_\_\_\_\_



## **AGRADECIMENTOS**

À Professora Dra. Zilda de Castro Silveira, orientadora com quem compartilho a paixão por dar vida às ideias - agradeço as palavras de confiança e o incentivo constante, durante todo esse tempo em que trabalhamos juntos;

À Professora Dra. Márcia Cristina Branciforti, pela ajuda na elaboração deste trabalho e por ser sempre atenciosa e incentivadora dos meus atos de equilíbrio;

À Professora Dra. Luciana Montanari, que no primeiro ano plantou a semente de tantos frutos que colho hoje - sua amizade é um dos mais preciosos;

Ao Professor Dr. Marcelo Falcão de Oliveira, que orientou meus primeiros passos pelo caminho da ciência e certamente inspira todos os alunos pela sua retidão e dedicação ao nosso curso;

Aos professores, técnicos e às secretárias do Departamento de Engenharia de Materiais por acolher de forma única nós da primeira turma do curso;

Aos amigos do Laboratório de Projetos, ao pessoal do Núcleo de Manufatura Avançada e ao pessoal do Serviço Gráfico da EESC e do Departamento de Engenharia de Materiais pelo companheirismo e ajuda na elaboração deste trabalho;

Aos amigos dessa jornada, por suavizarem os tantos momentos de ansiedade e preocupação ao longo desses anos todos - sentirei saudades;

Ao meu pai, Aparecido, minha mãe, Tereza e minha tia, Sueli, pelo esforço que fizeram por minha formação e às minhas irmãs, Camila, Katiuce e Cíntia, por oferecerem sempre seu melhor – vocês são minha força.





*“Os conhecimentos podem ser transmitidos, mas nunca a sabedoria. Podemos achá-la; podemos vivê-la; podemos consentir em que ela nos norteie; podemos fazer milagres através dela. Mas não nos é dado pronunciá-la e ensiná-la.”*

Hermann Hesse.

JUSTINO NETTO, J. M. **Caracterização da adesão em tecnologia LOM e proposta de *mock-up* de um sistema de deposição aplicado a uma impressora 3-D portátil.** 2015. 66p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

## RESUMO

Neste trabalho foi desenvolvido um estudo sobre a aplicação de adesivos, para uma impressora 3D portátil de baixo custo, com o objetivo de explorar alternativas de adesão em protótipos gerados com tecnologia LOM. Aplicações mais recentes dos processos de manufatura aditiva incluem a utilização de modelos físicos tridimensionais, em áreas como arqueologia, fabricação de joias e ciência forense. No Brasil, entretanto, há poucas informações sobre o uso de impressão 3D como ferramenta de apoio ao aprendizado, especificamente no ensino básico. Por outro lado, como um país em desenvolvimento, o Brasil ainda apresenta uma perspectiva de crescimento, em relação ao uso de papel. Essa condição ocorre em função do aumento do uso de computadores, copiadoras e impressoras, acompanhando o crescimento da população e a urbanização. Adicionalmente, observa-se um elevado descarte de papéis em ambientes de trabalho, incluindo as instituições de ensino básico e superior. Neste contexto, é proposto o estudo sistemático do projeto que inclui a caracterização de processos de adesão e o desenvolvimento da solução conceitual do mecanismo responsável pela deposição do adesivo sobre a matéria-prima. Para a seleção do adesivo foi utilizado o método de avaliação de variantes de solução, que indicou o poli (acetato de vinila) como opção mais adequada para a aplicação proposta. Em seguida, foram exploradas estratégias de deposição para identificar o método de recobrimento mais eficiente. Os testes da solução conceitual proposta em Endoh (2014), mostraram a solução baseada no princípio de nebulização do adesivo inadequada. Dessa forma, utilizando análise morfológica, identificou-se uma nova solução potencialmente viável análoga a um troca-tintas e novos experimentos foram conduzidos para determinar a formulação mais adequada do adesivo avaliando simultaneamente sua resistência relativa ao descascamento. Por fim, foi proposta a solução construtiva do dispositivo para geração de protótipos baseados na tecnologia LOM.

**Palavras-chave:** IMPRESSÃO 3D. LOM. METODOLOGIA DE PROJETO. *MOCK-UP*. TECNOLOGIA DE ADESIVOS.

JUSTINO NETTO, J. M. **Adhesion characterization on LOM technology and mock-up proposal for the deposition system of a portable 3D printer.** 2015. 66p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

## **ABSTRACT**

This work presents a study on the application of adhesives used in a low cost desktop 3D printer, aiming to explore adhesion alternatives of prototypes constructed by means of LOM technology. Worldwide rapid prototyping usage has increased significantly over the past 5 years with applications in different fields such as design development of consumer goods, biomedical devices and tissue engineering. Recent applications also include physical three-dimensional models designed for archaeology, jewellery and forensic science. Brazil, however, has few information on using 3D printing as learning support tool particularly in primary education. On the other hand, as a developing country, Brazil still presents a growth perspective regarding the use of paper. Such condition occurs due to the growing use of computers, copiers, printers and scanners, accompanying population growth and urbanization. In addition, there is a large generation of paper wastes at various working environments, including basic and higher education institutions. In this context, a systematic design study is proposed, approaching adhesion processes characterization and the conceptual development of the device responsible for depositing the adhesive over the feedstock. The adhesive was selected through principle solution variants evaluation method, leading to poly (vinyl acetate) as the most suitable option to the proposed application. Next, adhesive deposition strategies were explored in order to identify the most efficient coating methods. Results after testing the conceptual solution proposed by Endoh (2014) showed spraying principles to be inappropriate. Thereby, using morphological matrix, a novel and potentially feasible solution analogous to daubing processes was identified and new experiments were conducted in order to determine the most appropriate adhesive formulation assessing simultaneously its relative peeling resistance. Finally, the conceptual solution of the referred device was proposed.

**Keywords:** 3D PRINTING. LOM. DESIGN METHODOLOGY. MOCK-UP. ADHESIVE TECHNOLOGY.



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Gráfico de interesse de busca pelos termos “mcor” e “regrap” (ENDOH, 2014). .....	23
<b>Figura 2</b> Principais características da Mcor Iris. Adaptado de Endoh (2014). .....	24
<b>Figura 3</b> Principais características da Mcor Matrix 300+. Adaptado de Endoh (2014). .....	24
<b>Figura 4</b> Dispositivo de deposição de adesivo (MACCORMACK; MACCORMACK, 2010). .....	25
<b>Figura 5</b> Esquema das etapas envolvidas na tecnologia LOM. Adaptado de Gibson; Rosen; Stucker (2010). .....	29
<b>Figura 6</b> Sistema <i>Offset Fabbing, Ennex Corp.</i> Adaptado de Gibson; Rosen; Stucker (2010). .....	30
<b>Figura 7</b> Esquema ilustrando a orientação e deformação das gotículas no fluxo (DERKACH, 2010). .....	36
<b>Figura 8</b> Empacotamento máximo de partículas esféricas regulares (DERKACH, 2010). .....	37
<b>Figura 9</b> Esquema da sessão transversal de uma emulsão altamente concentrada (DERKACH, 2010). .....	37
<b>Figura 10</b> Dimensões do painel de teste e do corpo de prova para o ensaio de descascamento-T. Adaptado de ASTM D1876 (2008). .....	39
<b>Figura 11</b> Cinco representações materiais da atividade física, cada uma retratando um aspecto diferente da atividade física. Adaptado de KHOT; HJORTH; MUELLER (2014). .....	41
<b>Figura 12</b> Etapas da impressão 3D de objetos físicos representando dados relacionados a atividades físicas. Adaptado de KHOT; HJORTH; MUELLER (2014). .....	42
<b>Figura 13</b> Comparação da produção de papel e papel cartão entre os BRICs, economias em desenvolvimento e economias desenvolvidas de 1965 a 2009 (TISSARI, 2011). .....	42
<b>Figura 14</b> Evolução da produção brasileira de papel (PÖYRY, 2014). .....	43
<b>Figura 15</b> Árvore de objetivos. Adaptado de Pahl <i>et al.</i> (2007). .....	48
<b>Figura 16</b> Árvore de objetivos com fatores de ponderação. .....	49
<b>Figura 17</b> Dispositivos com liberação controlada de líquido e respectivos princípios de solução análogos. ....	53
<b>Figura 18</b> Espectro IV da amostra do adesivo usado na impressora <i>Mcor Iris</i> .....	54
<b>Figura 19</b> Material utilizado na preparação dos painéis laminados. ....	55
<b>Figura 20</b> Início e término do ensaio de descascamento-T para um dos corpos de prova. ....	55
<b>Figura 21</b> Gráfico Tensão x Deformação para corpo de prova laminado com adesivo contendo 15% de sólidos. ....	56

<b>Figura 22</b> Gráfico Tensão x Deformação para corpo de prova laminado com adesivo contendo 20% de sólidos. ....	56
<b>Figura 23</b> Componentes do dispositivo de deposição de adesivo. ....	58
<b>Figura 24</b> Vistas ortogonais e perspectiva em corte do dispositivo de aplicação do adesivo. ....	59
<b>Figura 25</b> Renderização do aspecto final da impressora, mostrando posicionamento do dispositivo de deposição de adesivo. Adaptado de Endoh (2014). ....	60
<b>Figura 26</b> <i>Mock-up</i> do dispositivo de disposição de adesivo. ....	61

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> Vantagens e desvantagens dos adesivos termoplásticos. Adaptado de Petrie (2006). .....	32
<b>Tabela 2</b> Comparação no comportamento reológico de suspensões e emulsões de acordo com a concentração. Adaptado de Derkach (2010). .....	38
<b>Tabela 3</b> Recicladores de papel no Brasil em 2002 (BRACELPA, 2002). .....	44
<b>Tabela 4</b> Taxa de recuperação de papéis recicláveis por tipo de geração em 2002 (BRACELPA, 2002). .....	44
<b>Tabela 5</b> Propriedades selecionadas PVA, PVB e PVOH. Adaptado de Petrie (2006). .....	47
<b>Tabela 6</b> Folha de avaliação desenvolvida para escolha do material aglutinante .....	50
<b>Tabela 7</b> Matriz morfológica com novos princípios de solução para aplicação do adesivo. Adaptado de Endoh (2014). .....	52
<b>Tabela 8</b> Formulações dos adesivos desenvolvidos. ....	54
<b>Tabela 9</b> Resultados de resistência ao descascamento dos ensaios realizados. ....	57





## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	19
1.1 OBJETIVO.....	21
1.2 MOTIVAÇÃO.....	21
2 REVISÃO DO ESTADO DA TÉCNICA.....	23
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
3.1 Manufatura Aditiva.....	27
3.2 A tecnologia LOM.....	27
3.2.1 Sequência deposição-corte.....	28
3.2.2 Sequência corte-deposição.....	29
3.3 Metodologia de projeto.....	31
3.3.1 Projeto Conceitual.....	31
3.4 Tecnologia de adesivos.....	32
3.5 Fundamentos da teoria de adesão.....	34
3.6 Considerações sobre reologia de polímeros em emulsão.....	36
3.7 Resistência ao descascamento.....	38
4 DEFINIÇÃO DO SEGMENTO DE APLICAÇÃO.....	41
5 DESENVOLVIMENTO SISTEMÁTICO DO PROJETO CONCEITUAL DO DISPOSITIVO.....	47
5.1 Avaliação das variantes da solução.....	47
5.2 Estudo sobre o adesivo escolhido.....	50
5.3 Escolha do método de aplicação do adesivo.....	51
5.4 Análise morfológica.....	51
5.5 Ensaio de Descascamento-T.....	53
5.6 Solução Construtiva do Dispositivo de Aplicação de Adesivo.....	57
6 GERAÇÃO DO <i>MOCK-UP</i> E PROJETO CONCEITUAL DA IMPRESSORA 3D.....	61
7 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	63
REFERÊNCIAS.....	65



## 1 INTRODUÇÃO

O uso da manufatura aditiva para geração e fabricação de peças e bens de consumo teve um aumento significativo nos últimos cinco anos. Entretanto, segundo o *McKinsey Global Institute* (2012) menos de 30% dos componentes obtidos, a partir de técnicas de manufatura aditiva foram utilizados como peças ou conjuntos funcionais. As principais indústrias usuárias dessa tecnologia, incluídas neste percentual foram a aeroespacial, automotiva e de processamento de plásticos. Foi no desenvolvimento de projetos personalizados, entretanto, que a aplicação da manufatura aditiva aumentou notavelmente, incluindo a fabricação de implantes dentários, dispositivos biomédicos e de bioengenharia e o segmento de joias.

A manufatura aditiva apresenta as características técnicas necessárias à flexibilização dos sistemas de manufatura que deverá ocorrer nos próximos anos, a qual é acompanhada pela redução significativa no ciclo de desenvolvimento de produtos, pela minimização do desperdício de material e de custos de ferramental e pela possibilidade de se fabricar formas e estruturas de alta complexidade. A rápida evolução das técnicas de manufatura aditiva oferece uma perspectiva real de aperfeiçoamento nos processos de deposição de material, principalmente na relação entre velocidade e controle e na melhoria e desenvolvimento de novos materiais que poderão ser processados em escala mais elevada, com uma significativa redução de custo.

As empresas desenvolvedoras de máquinas industriais de manufatura aditiva, como a *Stratasys®*, *3D Systems®*, *EOS®* e *Object®* estão em sua grande maioria localizadas nos EUA, Europa e Israel. A categoria de máquinas oferecida por tais desenvolvedores, implica em grandes preços de compra e despesas, incluindo os insumos e a manutenção periódica. Em geral, essas empresas detêm grande parte das patentes utilizadas nas principais tecnologias atuais, bem como dos materiais específicos para uso de seus equipamentos.

O uso da manufatura aditiva tem crescido também para aplicações “domésticas”, denominando-se comumente como impressão 3D. Tecnologias como a Estereolitografia (SLA) e a Modelagem por Deposição de Fundido (FDM), com variações no processo de extrusão, têm sido amplamente exploradas para esse tipo de impressoras 3D, pela maior facilidade de implementação e custo mais baixo.

Em relação ao uso da manufatura aditiva, na área de Pesquisa e Desenvolvimento, o desenvolvimento de projetos e de técnicas deve ser mais focado em atender requisitos específicos de diferentes áreas de pesquisa, permitindo uma estrutura aberta, para melhoria constante de tecnologias acessíveis a fim de se obter precisão e repetibilidade do processo.

Esse desenvolvimento pode incluir soluções construtivas de cabeçotes intercambiáveis que permitam melhor controle de processamento de polímeros e melhorias no projeto estrutural das impressoras 3D para uso em laboratórios de pesquisa.

A versão acadêmica *Fab@Home* e as opções comerciais: *RepRap*, *MakerBot* e *3D Cubex (3D Graph)* baseadas em tecnologia FDM e SLA apresentam estruturas semelhantes (movimentações da mesa no plano cartesiano). Os atuais cabeçotes de impressão 3D e a própria estrutura das máquinas base portáteis não contemplam o uso da matéria-prima sob a forma de pó virgem ou reutilizado, ou mesmo a reutilização de outros tipos de materiais, como papéis de imprimir e escrever. Como exemplo de tecnologia comercial, com máquina já no mercado, pode-se citar a tecnologia LOM (*Laminated Object Manufacturing*) desenvolvida pela *Helisys Inc.*, que utiliza camadas que são aderidas e revestidas com papel, polímeros ou metal laminados e colados sucessivamente, cortados conforme a geometria requerida com laser ou lâminas.

A tecnologia LOM, entretanto, apresenta-se comercialmente pouco explorada quando comparada às abordagens mais tradicionais de manufatura aditiva, como FDM e SLA. As máquinas disponíveis oferecidas pela *Mcor Technologies*, que utilizam papel e cola branca como matérias-primas, e *Solidimension*, que utilizam laminados poliméricos, são pouco portáteis e apresentam preço elevado, atendendo um nicho de mercado mais específico, voltado para arquitetura e *design*.

Dados sobre o volume de descarte de papéis de escrita e impressão e do significativo crescimento da produção de papel em países em desenvolvimento como China e Índia, estão frequentemente relacionados ao aumento nos impactos ambientais causados pela maior geração de resíduos sólidos, pela baixa eficiência de recuperação química e energética das plantas industriais, e pelo uso excessivo de matérias-primas. No Brasil, não há uma política clara sobre reciclagem dessa categoria de resíduo. Esforços pontuais são feitos, com cooperativas para reutilização e reciclagem de papéis, mas no contexto nacional, a efetividade ainda é incipiente.

Associado a esse cenário e à inclusão de novas tecnologias no ensino básico, o uso de papéis de impressão e escrita descartados em ambientes escolares e de escritório como matéria-prima para uma impressora 3-D baseada em tecnologia LOM se mostra bastante viável. Portanto, esse trabalho tem como objetivo estudar métodos de adesão e analisar soluções construtivas a fim de propor uma solução conceitual e o modelo geométrico do sistema de deposição de adesivo de uma máquina de impressão 3D baseada na tecnologia LOM. Como resultado, em médio prazo da pesquisa, espera-se obter um projeto detalhado e um protótipo funcional de uma impressora 3D que tenha custo reduzido e que utilize

papéis descartados para que possa ser levada para escolas da rede pública e privada, com o intuito de auxiliar nas aulas ministradas.

### **1.1 OBJETIVO**

O presente trabalho tem como objetivo apresentar o desenvolvimento sistemático do projeto conceitual de um dispositivo, para geração de protótipos em uma impressora 3D experimental, baseada na tecnologia LOM. Como premissa do trabalho, considerou-se o uso de papéis de escrita e impressão, descartados em ambiente de ensino e escritório como matéria-prima. A escolha do adesivo mais apropriado foi feita utilizando o método de análise das variantes de solução, baseado na caracterização dos fenômenos de adesão e o estudo do comportamento do adesivo após sua aplicação.

### **1.2 MOTIVAÇÃO**

A proposta de uma impressora 3D portátil e de baixo custo contempla sua implementação em instituições de ensino básico nas quais o uso de artefatos materiais que permitam a visualização tridimensional de estruturas representando conceitos complexos não foi viabilizado como instrumento de auxílio na aprendizagem até o momento.



## 2 REVISÃO DO ESTADO DA TÉCNICA

Como pode ser visto na **Figura 1**, o interesse no uso de impressoras 3D baseadas na tecnologia LOM é pequeno quando comparado à busca por impressoras 3D portáteis e de baixo custo baseadas na tecnologia FDM, como a *Reprap* e similares. De acordo com Endoh (2014), os únicos dispositivos disponíveis no mercado que utilizam a tecnologia LOM são fabricados pela *Mcor Technologies*, em que folhas de papel A4 são usadas como matéria-prima, e pela *Cubic Technologies*, cujas máquinas utilizam PVC laminado e um adesivo próprio.



**Figura 1** Gráfico de interesse de busca pelos termos “mcor” e “reprap” (ENDO, 2014).

Recentemente, a *Mcor Technologies* ganhou o prêmio *3D Print Show Green Award* por ser a única fabricante de impressoras 3D que utilizam papel e cola branca como matérias-primas, fazendo das suas impressoras as mais ecológicas do mundo. As principais características dos dois produtos oferecidos pela companhia, *Mcor Iris* e *Matrix 300+*, são elencadas na **Figura 2** e na **Figura 3**.



Mcor Iris		
Resolução dos eixos	x	12 $\mu\text{m}$
	y	12 $\mu\text{m}$
	z	100 $\mu\text{m}$
Volume do protótipo	256 x 169 x 150 mm	
Espessura da camada	100 $\mu\text{m}$	
Dimensões da impressora	950 x 700 x 800 mm	
Massa da impressora	160 kg	
Preço	US\$ 45000,00	

**Figura 2** Principais características da Mcor Iris. Adaptado de Endoh (2014).



Mcor Matrix 300+	
Resolução dos eixos	0,1 mm
Espessura da camada	100 $\mu\text{m}$
Dimensões da impressora	950 x 700 x 800 mm
Massa da impressora	160 kg
Preço	US\$ 15000,00

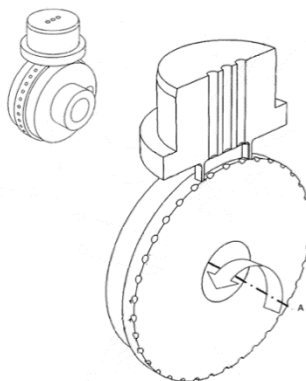
**Figura 3** Principais características da Mcor Matrix 300+. Adaptado de Endoh (2014).

Nota-se que apesar da ótima resolução, o nicho de mercado que é atendido pelas impressoras torna-se limitado devido ao seu grande porte e preço elevado. A excelência das impressoras fabricadas pela *Mcor Technologies* pode ser atribuída ao seu dispositivo de aplicação de adesivo, protegido pela patente GB 2 455 124 A, e ao sistema de impressão 3D colorida utilizado na impressora *Mcor Iris* e protegido pela patente WO2013174526 A1 (ENDO, 2014).

Como descrito na patente GB 2 455 124 A, o dispositivo mostrado na **Figura 4** consiste em um aplicador de adesivo formado por uma roda com vários sulcos circunferenciais espaçados para receber adesivo. A roda gira com velocidade controlada de modo a



carregar o adesivo presente em um ou mais sulcos ao ponto desejado do substrato, depositando porções controladas de adesivo sobre a superfície. Sobre a roda situa-se uma câmara selada acoplada a um reservatório pressurizado de adesivo que tem por objetivo preencher um ou mais sulcos à medida que a roda gira. Os sulcos comportam um volume de 10 a 50 nanolitros e a deposição efetiva do adesivo no substrato é propiciada por forças capilares (MACCORMACK; MACCORMACK, 2009).



**Figura 4** Dispositivo de deposição de adesivo (MACCORMACK; MACCORMACK, 2010).

Uma vez que os sistemas de manufatura aditiva baseados na tecnologia LOM anteriores utilizavam adesivos à base de solventes insolúveis em água e que o uso de adesivos com alto conteúdo líquido causa problemas de empenamento e distorção do papel, a referida invenção garante a deposição da quantidade adequada de um adesivo à base de água sem que ocorram problemas associados ao descarte dos materiais no meio ambiente, mas atendendo requisitos de boa resolução e adesão no laminado.

A partir do que foi discutido, pode-se concluir que a tecnologia LOM foi pouco explorada até o momento existindo a possibilidade de inovação na área, direcionada pela ausência de dispositivos de menor porte e economicamente mais acessível. A inexistência de outros métodos de aplicação do adesivo no substrato, potencialmente mais rápidos ou que necessitem de menos automação justifica a procura por novos princípios ainda inexplorados, que sejam comercialmente viáveis e que possam ser difundidos no mercado.



## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 Manufatura Aditiva

A manufatura aditiva tem como princípio básico a fabricação direta de componentes sem necessidade de planejamento de processo, a partir de um modelo inicialmente gerado usando um sistema de desenho auxiliado por computador (CAD 3D), simplificando significativamente o processo de produção de objetos tridimensionais complexos. Outros processos de manufatura requerem análise cuidadosa e detalhada da geometria das peças para determinar a ordem na qual as diferentes estruturas podem ser fabricadas, as ferramentas e processos que podem ser usados e os acessórios adicionais que podem ser necessários. Em contraste, a manufatura aditiva necessita apenas de detalhes tridimensionais básicos, entendimento de como a máquina funciona e conhecimento sobre quais materiais são usados (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2010).

A terminologia surgiu a partir da formação de um Comitê Técnico dentro da *American Society for Testing Materials Internacional* para diferenciação do termo Prototipagem Rápida, usado anteriormente e que não considerava a abordagem aditiva de fabricação de componentes cada vez mais próximos do produto final (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2010).

Uma vez que os objetos são construídos por camadas de espessura finita, o produto resultante será uma aproximação dos dados originais de modo que quanto mais fina as camadas, mais próxima a peça será do arquivo original. As máquinas variam no tipo de material utilizado e na maneira como as camadas são fixadas umas às outras. Tais diferenças determinam fatores como acuracidade da peça final, propriedades mecânicas, rapidez de construção, necessidade de pós-processamento e custo geral da máquina e do processo (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2010).

### 3.2 A tecnologia LOM

Uma das primeiras tecnologias de manufatura aditiva comercializadas em 1991 foi a Manufatura de Objetos Laminados (*Laminated Object Manufacturing*), baseada na deposição sequencial e corte de um material laminado, de acordo com as sessões transversais de um modelo CAD representadas em cada uma das camadas de material. A porção de material que não faz parte do modelo é cortada em um padrão xadrez, formando cubos que são destacados após o término da construção. Objetos grandes podem ser fabricados rapidamente e uma variedade de matérias primas pode ser usada, incluindo

papel, laminados poliméricos e metálicos. A natureza não tóxica do processo, o uso de matérias-primas estáveis e de fácil manuseio contribuem para a versatilidade e o baixo custo de material e de processo em relação a outros sistemas de manufatura aditiva (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2010).

A tecnologia LOM, entretanto, tem algumas limitações, incluindo a necessidade de tratamento dos objetos feitos em papel para prevenir absorção de umidade e desgaste excessivo; a dificuldade no controle da acuracidade da peça na dimensão Z, devido ao inchamento ou à espessura inconsistente do material; a não homogeneidade das propriedades mecânicas e térmicas, devido ao adesivo usado na estrutura laminada; e a suscetibilidade a danos em pequenos detalhes na etapa de retirada dos excessos. Ainda assim, peças produzidas em papel com tecnologia LOM tiveram aplicação bem-sucedida em indústrias como moldes para fundição em areia e na criação de mapas topográficos – onde cada camada representa uma elevação particular do mapa (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2010).

Muitas variantes do processo foram desenvolvidas com diferentes matérias-primas e estratégias de corte. Os principais processos podem ser caracterizados com base no mecanismo de adesão entre camadas a ser empregado, distinguindo-se o uso de adesivos ou colas, métodos térmicos de adesão, prensagem e soldagem ultrassônica. Outra classificação é possível baseada na sequência de processos, quais sejam as abordagens deposição-corte e corte-deposição (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2010).

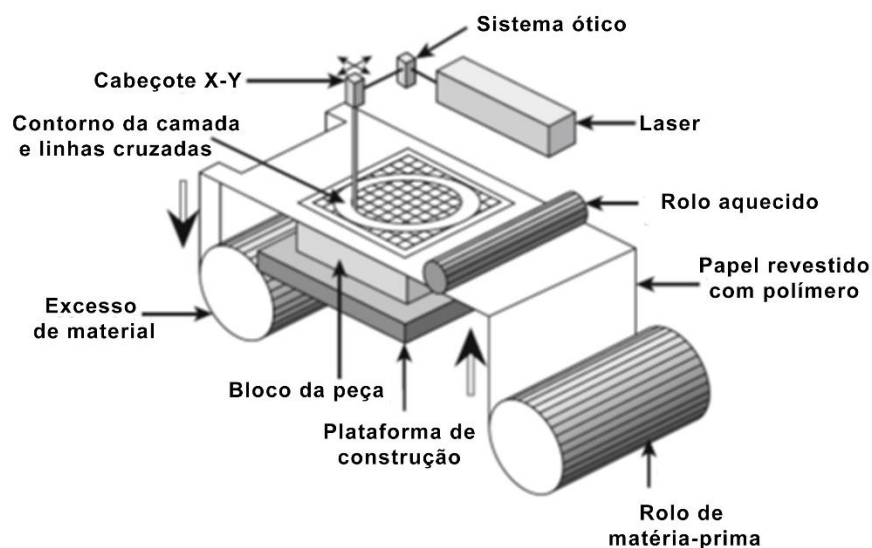
### **3.2.1 Sequência deposição-corte**

Na abordagem deposição-corte, o laminado é primeiramente colado ao substrato e então cortado de acordo com a sessão transversal do modelo. Nesses processos, a construção tipicamente consiste em três passos: colocação do laminado, adesão ao substrato e corte (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2010).

As máquinas LOM originais funcionavam segundo esta sequência, usando bobinas de laminado com uma das faces recoberta com material termoplástico, que era fundido a partir da passagem de um rolo aquecido, promovendo aderência entre as camadas. Após a deposição, um laser ou uma ferramenta de corte projetados para cortar apenas na profundidade de uma camada, reproduz o contorno da sessão transversal baseado na informação da fatia. O excesso de material permanece no lugar como suporte, sendo cortado em pequenos ladrilhos ou cubos (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2010).

O procedimento de colagem e corte é repetido até a construção completa do objeto. Após a construção, é necessária uma etapa de pós-processamento para a retirada das aparas de material em excesso que envolve o uso de ferramentas similares a cinzéis. Por ser relativamente difícil remover as aparas do bloco frio, a operação deve ocorrer imediatamente após a construção ou então será necessário aquecer o material por algum tempo para facilitar a operação. Um método alternativo, desenvolvido pela *Kira Corp.*, faz uso de papel sem revestimento termoplástico como material de construção, sendo utilizado um cabeçote típico de impressoras para a aplicação de uma resina na face superior da camada previamente depositada ou substrato nas regiões em que a colagem é desejada. Uma vez que o material de suporte não é colado, a etapa de remoção é mais fácil (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2010).

As vantagens da tecnologia LOM com abordagem deposição-corte incluem redução no encolhimento e nas tensões residuais e poucos problemas de distorção durante o processo. Além disso, quando a matéria-prima utilizada é o papel, o produto final é similar à madeira compensada, que é um material passível de operações de acabamento simples e comuns. Um esquema das etapas envolvidas na tecnologia LOM pode ser vista na **Figura 5** (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2010).

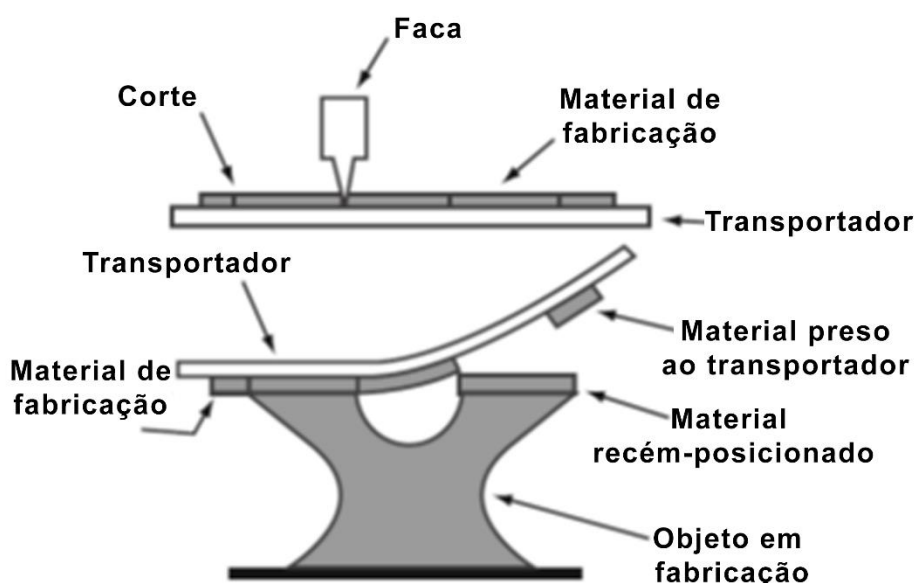


**Figura 5** Esquema das etapas envolvidas na tecnologia LOM. Adaptado de Gibson; Rosen; Stucker (2010).

### 3.2.2 Sequência corte-deposição

A outra abordagem corresponde aos processos em que o laminado é primeiramente cortado e depois colado ao substrato. Essa abordagem é comum quando se utilizam

materiais metálicos ou cerâmicos, sendo empregada a adesão térmica, mas sua implementação se restringe basicamente ao nível de pesquisa. Alternativamente, a *Ennex Corp.* patenteou um sistema chamado *Offset Fabling*, no qual um material laminado com adesivo em uma das faces é posicionado em um suporte e então cortado de acordo com a sessão transversal desejada, usando uma faca com movimentação bidimensional, incluindo linhas de partição e contornos de estruturas de suporte. O laminado cortado é então levado ao topo das camadas previamente depositadas, aderindo às superfícies. O processo continua até que o objeto se complete. Um esquema da abordagem é mostrado na **Figura 6** (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2010).



**Figura 6** Sistema *Offset Fabling*, *Ennex Corp.* Adaptado de Gibson; Rosen; Stucker (2010).

A abordagem corte-deposição facilita a construção de objetos com estruturas internas e canais. Tais estruturas são difíceis ou impossíveis de se obter com a abordagem deposição-corte, pois o material em excesso no interior dos componentes é sólido e, portanto, não pode ser removido, a menos que a parte seja cortada e aberta. Outra vantagem do processo corte-deposição é que não há risco de cortar as camadas anteriores, assim pode-se investir menos no controle de precisão do laser ou da faca de corte. Além disso, a etapa potencialmente danosa de remoção de material em excesso é eliminada. Entretanto, a abordagem requer suportes externos para a construção de estruturas pendentes e algum tipo de ferramenta de alinhamento para garantir o posicionamento exato da camada recém depositada com respeito às camadas anteriores (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2010).

### 3.3 Metodologia de projeto

De acordo com Pahl et al. (2007), metodologia de projeto pode ser definida como um plano de ações concretas para o projeto de sistemas técnicos, com utilização de informações derivadas da ciência do projeto, da psicologia cognitiva e da experiência prática em vários domínios. A metodologia inclui planos de ação que ligam etapas de trabalho e fases de projeto de acordo com seu conteúdo e organização. Tais planos devem ser adaptados de maneira flexível de acordo com uma tarefa ou objetivos específicos. Também fazem parte da metodologia estratégias, regras e princípios utilizados para atingir metas gerais ou específicas assim como métodos de resolução de problemas de projeto individuais ou tarefas parciais.

É importante salientar que o uso de uma metodologia não tem por objetivo eliminar a participação da intuição ou experiência no processo de desenvolvimento do projeto. Pelo contrário, o uso adicional de procedimentos sistemáticos serve para aumentar os resultados e a inventividade de projetistas talentosos. Qualquer abordagem lógica e sistemática, não importa quão exata seja, envolve a intuição, ou seja, uma ideia da solução geral. Assim, a metodologia de projeto deve promover e guiar as habilidades de projetistas, encorajar sua criatividade e ao mesmo tempo enfatizar a necessidade de uma avaliação objetiva dos resultados (PAHL *et al.*, 2007).

#### 3.3.1 Projeto Conceitual

De com o processo de planejamento e projeto proposto por Pahl *et al.* (2007), a etapa de projeto conceitual sucede o esclarecimento da tarefa. Essa etapa envolve a descoberta dos problemas essenciais, o estabelecimento de estruturas e função, a busca por princípios funcionais, a combinação de tais princípios em estruturas funcionais e a seleção de uma estrutura funcional e consolidação dessa estrutura em uma solução construtiva ou conceito.

A avaliação das estruturas funcionais geralmente depende de representações mais concretas que envolvem a seleção preliminar de materiais, a produção de um modelo aproximado e a consideração das possibilidades tecnológicas. Nessa etapa, as variantes de solução elaboradas devem ser avaliadas de modo que aquelas que não satisfazem as demandas do projeto sejam eliminadas e as restantes sejam julgadas pela aplicação metódica de critérios específicos. Ao final da avaliação, o melhor conceito pode ser escolhido (PAHL *et al.*, 2007).

A etapa de projeto conceitual é de fundamental importância pois nas etapas subsequentes de projeto preliminar e projeto detalhado é extremamente difícil ou impossível corrigir deficiências do princípio de solução. Em outras palavras, é mais provável que a solução mais viável despoite da escolha dos princípios mais apropriados do que a partir da concentração excessiva em detalhes técnicos (PAHL *et al.*, 2007).

### 3.4 Tecnologia de adesivos

De acordo com Petrie (2006), adesivos são substâncias capazes de manter unidas pelo menos duas interfaces de modo forte e permanente. Suas características devem ser tais de forma que se comportem como um líquido durante o período inicial de formação da junta para que possam fluir e molhar eficientemente as partes aderentes, desenvolvendo posteriormente forças intermoleculares que são responsáveis pela adesão entre as superfícies.

Os adesivos podem ser classificados de acordo com a composição química em termorrígidos, termoplásticos, elastoméricos e híbridos. Dentre os termoplásticos, alguns adesivos funcionam a partir da perda de solvente, que por sua vez pode ser à base de água ou de natureza orgânica. A **Tabela 1** apresenta uma comparação geral de desempenho entre os adesivos termoplásticos.

**Tabela 1** Vantagens e desvantagens dos adesivos termoplásticos. Adaptado de Petrie (2006).

Forma	Vantagens	Desvantagens
À base de água	Baixo custo	Menor resistência à umidade
	Não inflamável	Sujeito a congelamento
	Solvente atóxico	Encolhimento de tecidos
	Maior variabilidade no conteúdo sólido	Ondula ou enrugam papéis
	Maior variabilidade na viscosidade	Contaminação com metal no armazenamento e aplicação
	Penetração e molhabilidade podem variar	Secagem lenta
	Possibilidade de uso de material com alto peso molecular em alta concentração	Corrosivo para alguns metais Piores propriedades elétricas
À base de	Resistência à umidade	Perigo de fogo e explosão



solvente	Várias faixas de taxa de secagem	Toxidade
	Alta adesão desenvolvida rapidamente	Necessidade de equipamento à prova de explosão e sistema de ventilação
	Molha mais facilmente superfícies difíceis	

Dentre os adesivos baseados em elementos aglutinantes termoplásticos, o PVA e o PVOH são amplamente utilizados na indústria para colagem de papéis, madeiras e tecidos e o PVB é geralmente utilizado na fabricação de vidros laminados e na colagem de materiais inorgânicos, como metais e cerâmicas, podendo ser encontrado também em algumas composições de tintas ou revestimentos (PETRIE, 2006).

O poli (vinil acetato) é o mais versátil dos adesivos à base de resina vinílica. Os adesivos de PVA são geralmente encontrados como emulsões ou soluções, podendo ser plasticizados ou não. Sua formulação pode conter cargas ou pigmentos, dependendo da aplicação. O PVA é o aglutinante base das colas brancas comuns (PETRIE, 2006).

O adesivo deve ser aplicado a temperaturas entre 15°C e 32°C, podendo ser danificado por ciclos repetidos de congelamento e descongelamento e sua vida quando armazenado é geralmente limitada. O PVA é um adesivo relativamente flexível, especialmente sob baixas temperaturas. A resistência à maioria dos solventes e à umidade é baixa, entretanto esses adesivos suportam graxas, óleos e fluidos derivados de petróleo. Os filmes curados tendem a amolecer a temperaturas próximas a 45°C. Com a formulação adequada, esses adesivos podem apresentar baixo custo, alta adesão inicial e boas propriedades de preenchimento. Adesivos de PVA tendem a fluir sob carregamentos expressivos (PETRIE, 2006).

O poli (álcool vinílico) é uma resina termoplástica sintética solúvel em água que é encontrada geralmente em solução aquosa para a colagem de materiais porosos, como papel e tecidos. Com madeira e papel, os adesivos de PVOH perdem água rapidamente e conseqüentemente endurecem de forma rápida, permitindo o alívio da pressão em minutos após a montagem. Suas propriedades úmidas de adesão, combinadas com o endurecimento rápido fazem do PVOH muito útil para operações de rotulagem, empacotamento e laminação contínua de papel e lâminas, podendo ser usados ainda na selagem por calor (PETRIE, 2006).

A resistência à umidade é boa o suficiente para a maioria das aplicações interiores. A resistência à graxas e óleos é excelente. Não apresentam odor nem gosto, encontrando assim aplicação na indústria de embalagens de alimentos (PETRIE, 2006).

Os adesivos de polivinil acetal são geralmente formuladas com resinas de polivinil butiral ou polivinila formal. O PVB apresenta uma viscosidade menor quando fundido e é um polímero mais flexível promovendo melhor resistência ao descascamento. Os adesivos de polivinil butiral são fabricados como soluções de alta viscosidade e baixo conteúdo sólido. Podem ser brancos ou transparentes, sendo estáveis à luz e apresentando excelente adesão em vidros. A resistência à umidade é relativamente baixa, mas adequada para aplicações externas. O PVB é muito usado na laminação de vidros de segurança (PETRIE, 2006).

### **3.5 Fundamentos da teoria de adesão**

De acordo com Ebnesajjad (2008), existem diversas teorias que buscam descrever o fenômeno da adesão, sendo as mais tradicionais a teoria da adsorção, mecânica, de difusão e eletrostática. Em geral, nenhuma teoria quando considerada isoladamente é capaz de explicar a adesão de uma forma abrangente e, portanto, a combinação de teorias diferentes fornece os conceitos e informações necessários ao entendimento dos requisitos básicos para a boa utilização dos adesivos.

Segundo a teoria mecânica, a adesão ocorre devido à penetração do adesivo nas irregularidades superficiais do substrato com consequente deslocamento do ar aprisionado na interface de modo a produzir no sistema um intertravamento mecânico. Neste caso, a interação entre o adesivo e o substrato ocorre em escala microscópica, devido à rugosidade superficial do material no qual o adesivo é aplicado. Assim, quanto mais porosas ou rugosas as superfícies, mais fortes são as ligações formadas na junta. Além do intertravamento mecânico, contribuem para a resistência da junta a existência de uma superfície limpa e altamente reativa e o aumento da área de contato (EBNESAJJAD, 2008).

A teoria eletrostática propõe que a adesão ocorre por meio de uma transferência de elétrons entre o adesivo e o substrato como resultado do contato entre materiais com estruturas de bandas distintas. A formação de uma dupla camada de forças eletrostáticas na interface adesivo-substrato é responsável pela resistência à separação. De fato, essa teoria é geralmente aplicada para explicar as ligações entre metais e polímeros e ganha força com a observação de descargas elétricas entre o adesivo e o substrato em ensaios de descascamento (EBNESAJJAD, 2008).

A teoria da difusão sugere que a adesão é desenvolvida através da difusão de moléculas entre o adesivo e o substrato. Essa teoria é mais aplicável quando o adesivo e o substrato são polímeros com cadeias moleculares relativamente longas e capazes de se

movimentar. A camada interfacial onde ocorre a difusão tem uma espessura típica de 1 a 100 nanômetros, o que impede que se desenvolvam concentrações de tensão no local pois não existem descontinuidades nas propriedades físicas. Acredita-se que na cementação por solventes e na soldagem de termoplásticos ocorra a difusão das moléculas (EBNESAJJAD, 2008).

A teoria da adsorção propõe que a adesão resulte do contato molecular, ou molhamento, entre dois materiais de modo que se desenvolvam forças interfaciais entre o adesivo e os substratos. Para que o molhamento ocorra, o adesivo deve ter uma tensão superficial menor que a tensão superficial crítica do sólido, razão pela qual busca-se aumentar a energia e polaridade de muitos polímeros através de tratamentos superficiais. Durante o molhamento, são desenvolvidas forças de van der Waals que são extremamente sensíveis à distância entre as moléculas, diminuindo com o inverso da sétima potência da distância entre as moléculas. Na maioria dos casos, entretanto, a contribuição dessas forças é pequena em comparação com os fenômenos descritos anteriormente (EBNESAJJAD, 2008).

Além da natureza e do estado do substrato, boa parte das interações que ocorrem na aplicação dos adesivos deve-se à sua formulação. Como ocorrem com as tintas, os adesivos contêm vários componentes além do aglutinante, que é o material propriamente responsável pela formação da junta, incluindo agentes endurecedores, solventes, diluentes, cargas, reforços, espessantes, entre outros (EBNESAJJAD, 2008).

Os solventes, em especial, são utilizados para reduzir a viscosidade do adesivo de modo a melhorar seu espalhamento nos substratos. Para atingir as condições desejadas de processabilidade em resinas sintéticas e elastômeros, geralmente utiliza-se uma combinação de solventes orgânicos de diferentes volatilidades. Diferentemente dos solventes, os diluentes são ingredientes líquidos adicionados para reduzir a concentração do aglutinante que não evaporam, empregados também com a intenção de reduzir a viscosidade e modificar as condições de processamento de alguns adesivos (EBNESAJJAD, 2008).

Algumas das principais vantagens dos adesivos em emulsão incluem a formação relativamente rápida da junta (dependendo de condições específicas do substrato e da capacidade de adesão) em comparação com os resultados obtidos em adesivos em solução. O veículo (água) é barato e ambientalmente seguro. Entre as limitações, pode-se citar a baixa velocidade de endurecimento, intermediária entre adesivos em solução aquosa e adesivos *hot melt* e a resistência à água do filme de adesivo seco que, apesar de razoável, tende a ser adversamente afetada pela presença de quantidades residuais de

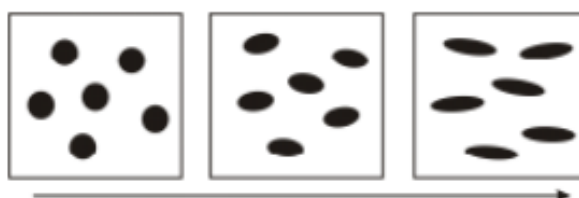
partículas coloidais protetivas solúveis em água. Além disso, quando aplicados convencionalmente, pelo menos um dos substratos deve apresentar superfície porosa (EBNESAJJAD, 2008).

### 3.6 Considerações sobre reologia de polímeros em emulsão

Os adesivos podem ser classificados de acordo com sua forma física em líquidos, pós, filmes ou pastas. As formulações de adesivos líquidos mais comuns apresentam seus componentes dissolvidos ou dispersos em água. Dentre os adesivos à base de água, destacam-se as emulsões, que são dispersões estáveis de compostos líquidos em um meio líquido (EBNESAJJAD, 2008).

Nas emulsões, a fase dispersa é formada por micelas coloidais levemente curadas ou compostos poliméricos aglomerados em gotículas que não podem fluir, mas são facilmente deformadas sob ação de esforços externos. Tais materiais, classificados por Gennes como “matéria condensada mole”, demonstram propriedades muitas vezes incomuns e que não podem ser diretamente previstas com base apenas em suas características atômicas e moleculares, pois a matéria mole tende a exibir auto-organização da escala nano ou micrométrica em estruturas mesoscópicas. Dessa forma, as propriedades reológicas das emulsões estão intimamente relacionadas com sua estrutura, cujo parâmetro central de estudo é a concentração ( $\phi$ ) da fase interna (DERKACH, 2010).

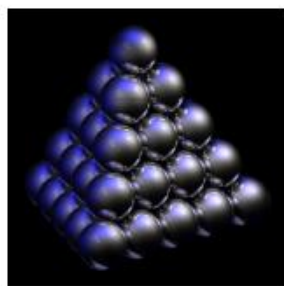
De acordo com a concentração, as emulsões podem ser classificadas em emulsões diluídas, semidiluídas, concentradas e altamente concentradas. As emulsões diluídas, que apresentam concentração volumétrica de até 25%, caracterizam-se pelo considerável afastamento entre as gotículas de modo que as distorções nas linhas de fluxo da fase contínua que circunda uma única gotícula não interferem nas outras gotículas, como pode ser visto na **Figura 7**. Nas emulsões diluídas, observa-se uma relação linear entre a viscosidade e a concentração volumétrica da fase dispersa (DERKACH, 2010).



**Figura 7** Esquema ilustrando a orientação e deformação das gotículas no fluxo (DERKACH, 2010).

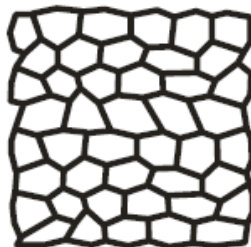
O aumento da concentração possibilita que ocorra certa interação hidrodinâmica entre os campos de fluxo ao redor de diferentes gotículas, o que faz com que a viscosidade nas emulsões semidiluídas não mais se relacione linearmente com a concentração. Tais efeitos não-Newtonianos são supostamente causados pela deformação, orientação e desorientação das gotículas líquidas (DERKACH, 2010).

Quando a concentração atinge a faixa de 70% a 75%, forma-se uma rede contínua de estrutura similar àquela obtida no empacotamento de esferas regulares, ilustrado na **Figura 8**. Tal estrutura favorece o aparecimento de uma tensão de escoamento nas emulsões concentradas, o que leva a um comportamento plástico parecido com o que ocorre nos corpos sólidos típicos (DERKACH, 2010).



**Figura 8** Empacotamento máximo de partículas esféricas regulares (DERKACH, 2010).

A capacidade de deformação das gotículas nas emulsões concentradas possibilita o aumento de sua concentração para além do empacotamento teórico máximo através da compactação das gotículas, formando-se as chamadas emulsões altamente concentradas. Como visto no esquema da **Figura 9**, a fase contínua apresenta-se como finas camadas entre gotículas de formato poliédrico (DERKACH, 2010).



**Figura 9** Esquema da sessão transversal de uma emulsão altamente concentrada (DERKACH, 2010).

As emulsões altamente concentradas apresentam comportamento similar ao dos sólidos até que a tensão aplicada ultrapasse a tensão de escoamento, com conseqüente formação de um fluxo não-Newtoniano. Nestas, acredita-se que o componente elástico deva-se principalmente à significativa interação entre as gotículas (DERKACH, 2010).

Grande parte do que se sabe sobre o comportamento reológico das emulsões baseia-se no estudo de suspensões. De fato, nas emulsões diluídas a pouca interação entre as gotículas aproxima seu comportamento ao das esferas sólidas presentes nas suspensões. Entretanto, como visto na **Tabela 2**, enquanto o aumento da concentração leva à deformação das gotículas líquidas nas emulsões, nas suspensões ocorre à compressão das esferas sólidas e assim seu comportamento reológico passa a ser regido por diferentes fenômenos.

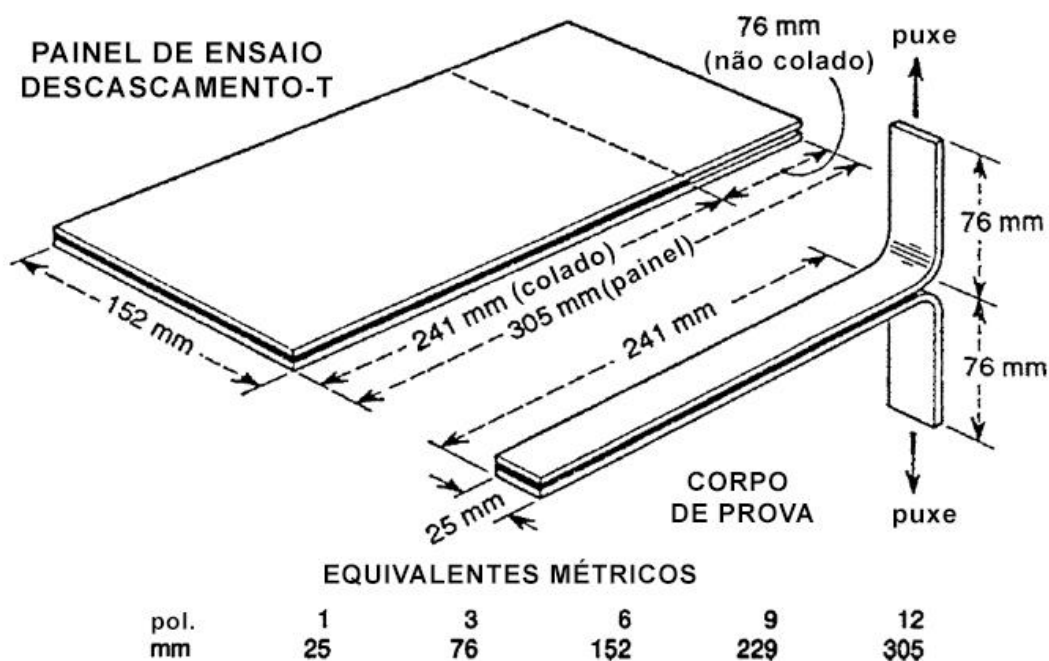
**Tabela 2** Comparação no comportamento reológico de suspensões e emulsões de acordo com a concentração. Adaptado de Derkach (2010).

Aspectos Característicos		
Intervalo de Concentrações	Fase Interna	
	Suspensões (partículas sólidas)	Emulsões (gotículas líquidas)
0 - $\phi_{\text{percolação}}$	Crescimento linear da viscosidade	Crescimento linear da viscosidade
	Tensão de escoamento	Comportamento não Newtoniano
	Comportamento não Newtoniano	
$\phi_{\text{percolação}}$ - $\phi_{\text{empacotamento max}}$	Comportamento visco-plástico	Aumento pronunciado da viscosidade com aumento da concentração
	Aumento pronunciado da viscosidade e efeitos não Newtonianos	
$\phi_{\text{empacotamento max}}$ - 1	Compressão	Comportamento não Newtoniano
		Tensão de escoamento
	Impossível	Comportamento visco-plástico e efeitos não Newtonianos pronunciados

### 3.7 Resistência ao descascamento

Os ensaios que envolvem a resistência ao descascamento são muito importantes na tecnologia de adesivos pois nessas condições os adesivos são notoriamente fracos. Tais testes envolvem o descascamento de um substrato flexível colado em outro sob um ângulo de 90° ou 180°. O ensaio mais comum de resistência ao descascamento é o

Descascamento-T e as dimensões dos corpos de prova são mostradas na **Figura 10** (PETRIE, 2006).



**Figura 10** Dimensões do painel de teste e do corpo de prova para o ensaio de descascamento-T. Adaptado de ASTM D1876 (2008).

Os valores da resistência ao descascamento são expressos em unidades de força por largura do espécime ensaiado [N/m] e tendem a flutuar mais do que qualquer outro ensaio em adesivos devido à área extremamente pequena à qual a tensão é localizada durante a sollicitação. Mesmo durante os ensaios, a resistência ao descascamento tende a flutuar dependendo do tipo de adesivo, substrato e das condições do ensaio. A resistência ao descascamento é tomada como o valor médio da porção central da curva, geralmente em até pelo menos 127 mm de distância descascada. A taxa de carregamento na qual a carga é aplicada e as dimensões dos corpos de prova são especificadas pela norma ASTM 1876 (PETRIE, 2006).



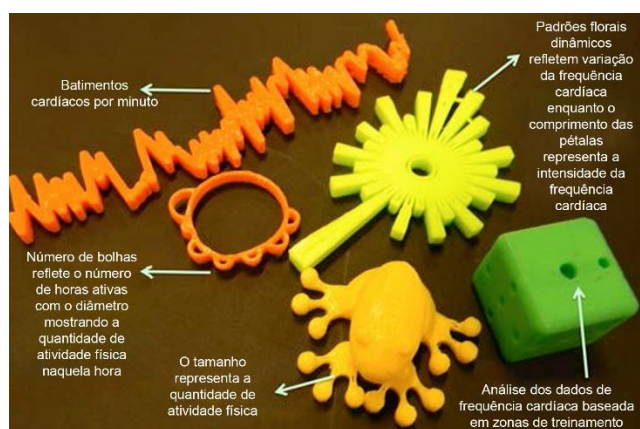


#### 4 DEFINIÇÃO DO SEGMENTO DE APLICAÇÃO

Objetos físicos, quando usados como representações materiais de ideias, dados ou conceitos carregam significados além da informação contida em sua materialidade física real, pois podem ser tocados, explorados, transportados e até processados proporcionando experiências de aprendizado mais completas. Royo 1996 *apud* CALDEIRA (2009) distingue sete funções para o material na prática educativa: função informadora, estruturadora, modeladora, mediadora, relacional, simbólica representativa e instrutiva, que são desempenhadas mediante as diferentes modalidades de interação entre o aluno e objeto.

O ensino básico de matemática, por exemplo, conta já há algum tempo com o uso de materiais manipulativos tradicionais para representação concreta de conceitos abstratos. De acordo com Ponte e Serrazina 2000 *apud* CALDEIRA (2009), a manipulação de jogos, instrumentos, modelos e ábacos, entre outros, pelos alunos pode facilitar a construção de conceitos e para Turrioni 2004 *apud* CALDEIRA (2009), esse tipo de material exerce um papel importante na aprendizagem, pois facilita à observação e a análise, desenvolvendo o raciocínio lógico, crítico e científico, sendo excelente para auxiliar ao aluno na construção de seus conhecimentos.

Alinhados com a tendência de popularização das máquinas de impressão 3D e com a crescente investigação do papel da fabricação digital na interação entre o homem e sistemas digitais, Khot, Hjorth e Mueller (2014), avaliaram o benefício proporcionado pela incorporação de artefatos fabricados em impressoras 3D representando dados tais como a frequência cardíaca e o número de passos registrados em pedômetros, no comprometimento das pessoas com um estilo de vida mais saudável. A **Figura 11** mostra como esses dados foram representados.



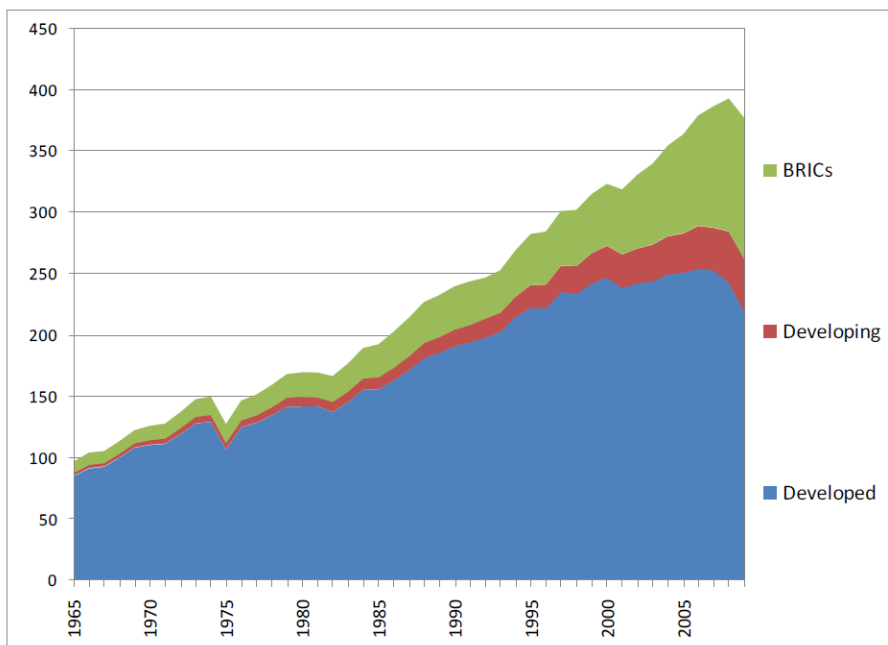
**Figura 11** Cinco representações materiais da atividade física, cada uma retratando um aspecto diferente da atividade física. Adaptado de KHOT; HJORTH; MUELLER (2014).

Segundo os autores, o uso dos artefatos materiais de acordo com o esquema mostrado na **Figura 12** fez os participantes mais conscientes sobre seu envolvimento nas atividades físicas, com maior entendimento de suas respostas corporais e maior capacidade de reflexão sobre seu condicionamento físico.



**Figura 12** Etapas da impressão 3D de objetos físicos representando dados relacionados a atividades físicas. Adaptado de KHOT; HJORTH; MUELLER (2014).

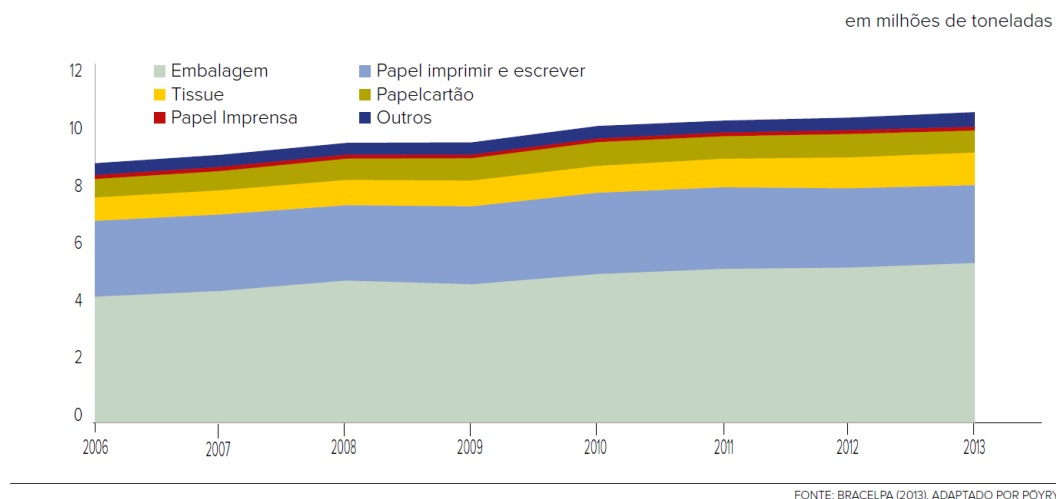
Paralelamente, como visto na **Figura 13**, os países desenvolvidos detinham 70% da produção global de papel e papelão em 2004, enquanto quatro dos BRICS (Brasil, Rússia, Índia e China) detinham 20%. Já em 2009, os BRICS aumentaram sua fatia para 30% e outros países em desenvolvimento passaram a somar 11,5% do total mundial (TISSARI, 2011).



**Figura 13** Comparação da produção de papel e papel cartão entre os BRICS, economias em desenvolvimento e economias desenvolvidas de 1965 a 2009 (TISSARI, 2011).

O Brasil apresentou crescimento na produção de papel e papelão nos últimos anos, atingindo 10,4 milhões toneladas em 2013, das quais aproximadamente 3 milhões correspondem aos papéis de imprimir e escrever, como pode ser visto na **Figura 14**. A utilização desse tipo de papel em particular acompanha o aumento no uso de computadores, copiadoras e impressoras, contrariando as expectativas de substituição do papel por tecnologias digitais.

EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO BRASILEIRA DE PAPEL



**Figura 14** Evolução da produção brasileira de papel (PÖYRY, 2014).

Em 2013, o Brasil atingiu uma taxa de recuperação de papéis recicláveis de 58,9%, sendo os papéis ondulados e Kraft responsáveis por 78,4% da taxa de recuperação, muito abaixo da taxa de recuperação de papel e papelão na Europa, que atingiu 71,7% em 2013 (ERPC, 2013).

O potencial para a reciclagem e reutilização de papel no Brasil é vasto. De acordo com a BRACELPA, em 2002 foi produzido apenas 37,4% de papel reciclado em relação à produção total, como mostrado na **Tabela 3**, enquanto a taxa de recuperação de papéis recicláveis de imprimir e escrever, matéria-prima potencial para a máquina em desenvolvimento, em 2002 foi apenas de 24,7 % de acordo com a **Tabela 4**.

**Tabela 3** Recicladores de papel no Brasil em 2002 (BRACELPA, 2002).

Estados	Produção total de papel mil t (a)	Fabricantes recicladores		(b)/(a) %
		Número de empresas	Produção das empresas mil t (b)	
São Paulo	3.464,3	42	1.167,2	33,7
Paraná	1.582,9	20	382,3	24,2
Santa Catarina	1.440,0	17	497,4	34,5
Minas Gerais	369,0	15	369,0	100,0
Bahia	291,2	4	64,3	22,1
Rio de Janeiro	189,2	8	155,2	82,0
Rio Grande do Sul	178,6	9	104,6	58,6
Pernambuco	113,3	2	81,8	72,2
Maranhão	67,3	1	5,5	8,2
Amazonas	26,7	2	26,7	100,0
Pará	23,2	1	23,2	100,0
Goiás	13,7	2	13,7	100,0
Paraíba	6,0	1	6,0	100,0
Ceará	2,7	2	2,7	100,0
Sergipe	3,4	1	3,4	100,0
Rio Grande do Norte	2,4	1	2,4	100,0
<b>Total geral</b>	<b>7.773,9</b>	<b>128</b>	<b>2.905,4</b>	<b>37,4</b>

**Tabela 4** Taxa de recuperação de papéis recicláveis por tipo de geração em 2002 (BRACELPA, 2002).

Discriminação	Papéis recicláveis	Consumo aparente	(1)/(2) %
	recuperados (1) mil t	de papel (2) mil t	
<b>Imprensa</b>	220,2	495	44,5
<b>Imprimir e escrever</b>	428,3	1.732	24,7
<b>Embalagem</b>			
. kraft	234,8	444	52,9
. papéis para ondulado	1.944,8	2.515	77,3
. embalagem geral	20,6	263	7,8
<b>Papelcartão</b>	146,8	484	30,3
<b>Sanitários</b>	-	627	-
<b>Outros</b>			
. cartolinas, papelão e polpa moldada	21,9	220	10,0
. papéis especiais	-	99	-
<b>TOTAL</b>	<b>3.017,4</b>	<b>6.879</b>	<b>43,9</b>
<b>Fonte: Associação Brasileira de Celulose e Papel - BRACELPA</b>			

Apesar das vantagens, reconhecidamente apontadas na utilização de artefatos materiais como instrumentos de auxílio na aprendizagem e da facilidade de fabricação de objetos complexos proporcionada pela impressão 3D, a utilização de métodos de fabricação digital para a geração de materiais de apoio ao ensino básico ainda não é contemplada no Brasil. Dessa forma e em acordo com a tendência de crescimento da produção de papel acompanhada com a necessidade de implementação de políticas de reuso e reciclagem desse tipo de material nos diversos ambientes em que é utilizado, surge a oportunidade de projetar uma máquina de impressão 3D baseada na tecnologia de Manufatura de Objetos

Laminados (LOM) capaz de reaproveitar papéis de imprimir e escrever como matéria-prima para a construção de materiais didáticos que possam ser empregados em novas práticas de ensino e aprendizagem.



## 5 DESENVOLVIMENTO SISTEMÁTICO DO PROJETO CONCEITUAL DO DISPOSITIVO

### 5.1 Avaliação das variantes da solução

Para estabelecer um critério quantitativo na escolha dos diferentes tipos de adesivos, foi implementado um procedimento de análise de variantes de solução contida na área da Metodologia de Projeto, que permitiu a determinação do adesivo mais adequado à consolidação das várias camadas de papel utilizada durante a construção de modelos com tecnologia LOM, de acordo com critérios técnicos derivados dos requisitos de projeto.

A avaliação considera as informações do Capítulo 4 sobre tecnologia de adesivos a partir das quais o PVA, PVB e PVOH são apontados como possíveis soluções. A comparação entre as propriedades dos adesivos citados com relação ao custo, inflamabilidade, resistência relativa ao descascamento, tempo de validade, tempo de pega, solubilidade e disponibilidade no mercado mostrada na **Tabela 5** serviu de base para a atribuição de valores técnicos, ecológicos, econômicos e de segurança de acordo com o processo indicado por Pahl *et al.* (2007).

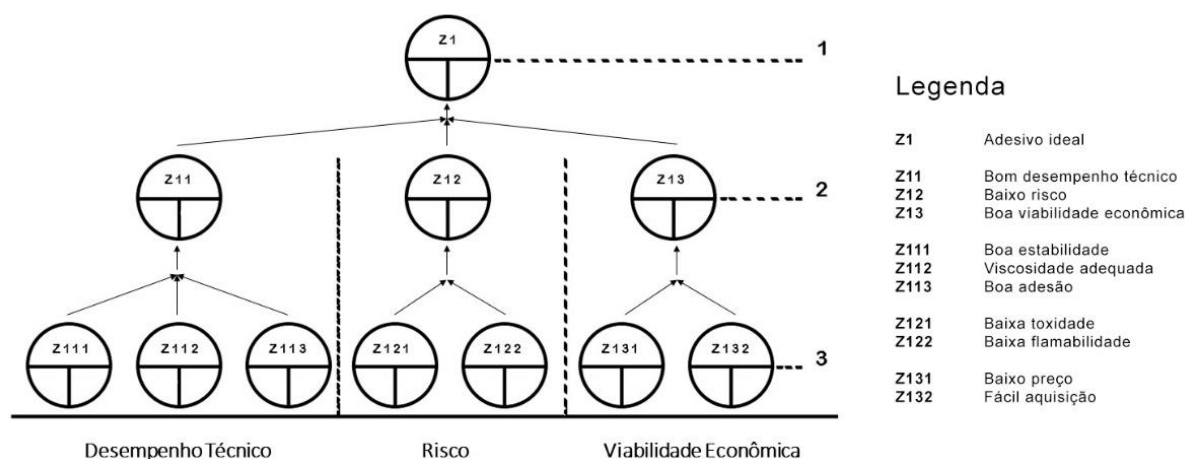
**Tabela 5** Propriedades selecionadas PVA, PVB e PVOH. Adaptado de Petrie (2006).

Propriedade	PVA	PVB	PVOH
Tempo de validade	Baixo	Médio	Baixo
Tempo de pega	Médio	Médio	Rápido
Disponibilidade	Alta	Média	Média
Inflamabilidade	Não	Sim	Não
Resistência Relativa ao Descascamento	Média	Média	Baixa
Custo	Baixo	Médio	Baixo
Solubilidade	Água	Solventes orgânicos	Água

A avaliação calcula o valor, benefício ou potência de uma solução em relação a objetivos preestabelecidos que são indispensáveis, uma vez que o valor de uma solução não pode ser considerado em absoluto, mas somente mensurado em relação a certos requisitos. O procedimento básico de avaliação começa com a identificação de critérios que

por sua vez são derivados dos objetivos, ou seja, dos requisitos e condicionantes gerais que são geralmente reconhecidos durante a elaboração da solução. As metas devem atender os requisitos da forma mais completa possível, sendo independentes entre si e devem de preferência ser caracterizadas em termos verbais quantitativos ou pelo menos qualitativos (PAHL et al., 2007).

A sistematização proposta por Pahl et al. (2007), apoia-se na elaboração de uma árvore na qual cada um dos objetivos é subdividido em uma ordem hierárquica. Na vertical, as metas são lançadas em níveis de complexidade decrescente e, na horizontal, os objetivos são lançados por setores, tais como setor técnico, econômico e ambiental, facilitando o projetista a julgar se foram incluídas todas as metas relevantes para a decisão e simplificando a avaliação da importância relativa das metas no valor global da solução. Os objetivos podem ser observados na **Figura 15**, que também mostra os critérios de avaliação derivados das metas das etapas de menor complexidade.

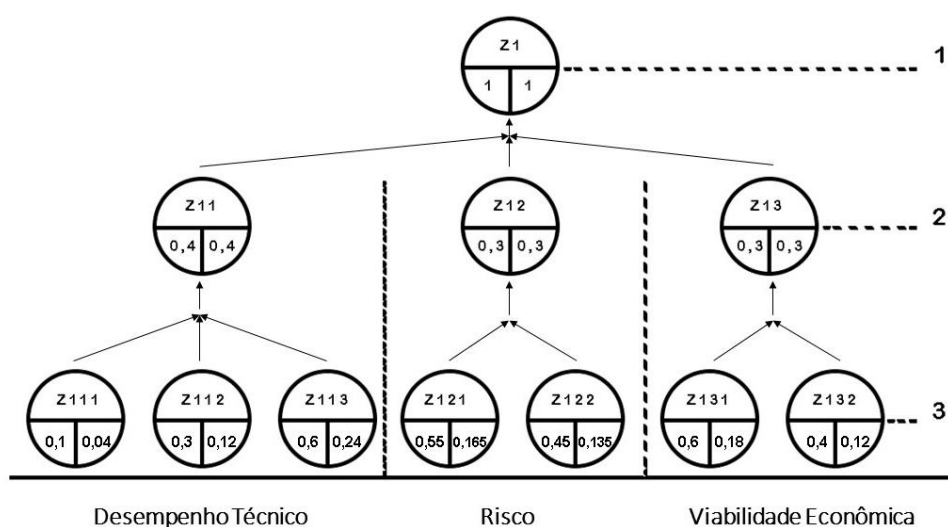


**Figura 15** Árvore de objetivos. Adaptado de Pahl et al. (2007).

Em seguida procedeu-se com a identificação da importância relativa de cada meta, para que critérios possivelmente irrelevantes pudessem ser eliminados antes de iniciar a avaliação propriamente dita. Os critérios remanescentes, apesar de apresentarem relevâncias diferentes, foram tipificados como fatores de ponderação ou peso, sendo levados em consideração na etapa subsequente de avaliação. Os valores atribuídos pertenciam ao intervalo de 0 a 1, de forma que a soma dos fatores de todos as metas de um mesmo nível de complexidade fosse igual a 1, visando uma ponderação percentual das metas. As ponderações foram feitas avaliando todos os critérios de um mesmo nível de complexidade por vez, isto é, horizontalmente (PAHL et al., 2007).



O fator de ponderação da meta de um determinado nível em relação à meta de maior complexidade (Z1) é obtido pela multiplicação do fator deste nível pelos fatores de ponderação dos níveis de metas superiores. Tal ponderação por níveis possibilita uma pontuação mais realista uma vez que é mais fácil ponderar duas ou três metas em relação a uma meta imediatamente superior do que limitar a ponderação a um mesmo nível. A **Figura 16** mostra as metas com seus respectivos fatores de ponderação (PAHL et al., 2007).



**Figura 16** Árvore de objetivos com fatores de ponderação.

Após estabelecer critérios de avaliação e definir sua relevância, estes foram correlacionados a parâmetros conhecidos, caracterizados por asserções verbais concretas. É recomendado por Pahl et al. (2007), que essa correlação seja feita numa folha de avaliação, na qual os parâmetros relevantes ou que satisfazem os critérios de avaliação são lançados na coluna da respectiva variante. A análise de valores denomina esses parâmetros como valores-alvo, agrupando-os juntamente com os critérios de avaliação em uma matriz-alvo.

A atribuição de valores, que consiste na avaliação das soluções de acordo com cada critério, é uma etapa inerentemente subjetiva. A pontuação varia de 0 a 10 e deve ser realizada segundo as chamadas funções de valor, de acordo com as quais, cada parâmetro dos critérios de avaliação são relacionados escalonadamente às ideias de valor. As funções de valor podem ser derivadas de uma conhecida relação matemática ou estimadas através da experiência do avaliador (PAHL et al., 2007).

Os valores para cada uma das variantes com base nos critérios são lançados na folha de avaliação, sendo ponderados de acordo com os fatores estabelecidos nas etapas anteriores. A **Tabela 6** mostra a folha de avaliação completa, na qual a linha mais inferior apresenta os valores globais não ponderados e ponderados para cada variante. Para comparação entre as variantes, foi adotado o critério do valor global máximo, de acordo com o qual a variante PVA é a melhor solução, pois apresenta maior valor global.

**Tabela 6** Folha de avaliação desenvolvida para escolha do material aglutinante

Critérios de Avaliação			Parâmetros		PVA			PVB			PVOH		
Nr.	Denominação	Fator		Unidade	Característica (ei1)	Valor (wi1)	Valor Ponderado (wgi1)	Característica (ei2)	Valor (wi2)	Valor Ponderado (wgi2)	Característica (ei3)	Valor (wi3)	Valor Ponderado (wgi3)
1	Boa Estabilidade	0,04	Validade	Anos	Baixo	4	0,16	Médio	6	0,24	Baixo	4	0,16
2	Viscosidade Adequada	0,12	Resistência ao Fluxo	cP	Médio	5	0,6	Alto	7	0,84	Alto	6	0,72
3	Boa Adesão	0,24	Resistência Relativa ao Descascamento	N/m	Médio	6	1,44	Médio	6	1,44	Baixo	2	0,48
4	Baixa Toxicidade	0,165	Presença de Solvente	Sim/Não	Alto	8	1,32	Baixo	3	0,495	Alto	8	1,32
5	Baixa Inflamabilidade	0,135	Tendência à Combustão	Sim/Não	Alto	9	1,215	Baixo	4	0,54	Alto	9	1,215
6	Baixo Preço	0,18	Preço do Adesivo	R\$	Alto	9	1,62	Médio	5	0,9	Alto	9	1,62
7	Fácil Aquisição	0,12	Acessibilidade ao Adesivo	Disponibilidade no mercado	Alto	9	1,08	Médio	6	0,72	Alto	7	0,84
<b>Somatória dos Fatores</b>		1	-	-	-	50	7,435	-	37	5,175	-	45	6,355

## 5.2 Estudo sobre o adesivo escolhido

Em seu estado puro, o PVA não é apropriado para uso como adesivo pois forma filmes frágeis e apresenta capacidade limitada de adesão. Entretanto, por ser compatível com vários agentes modificadores tais como plasticizantes e espessantes, o PVA pode ser encontrado em uma vasta gama de adesivos que atendem demandas específicas para muitas aplicações diferentes (PACKHAM, 2005).

Os adesivos à base de PVA são geralmente fabricados através de polimerização por emulsão, um processo no qual o monômero acetato de vinila é emulsificado em água e polimerizado com o uso de catalisador. A presença de surfactantes e partículas coloidais protetivas solúveis em água facilita a estabilização das partículas discretas do homopolímero na fase aquosa. Tais adesivos são amplamente utilizados em atividades escolares diversas, sendo mais conhecidos como cola branca ou cola lavável e apresentam, de acordo com o fabricante Henkel Brasil Ltda, um teor de sólidos que varia de 23% a 25%.

A adesão pode ser atribuída a fatores mecânicos e de adsorção química. Quando um filme de emulsão adesivo inicialmente caracterizado como uma fase aquosa contendo partículas poliméricas discretas estáveis é aplicada entre duas superfícies porosas e os três componentes são sujeitos à compressão adequada, ocorre o molhamento das superfícies dos substratos, com conseqüente absorção da fase aquosa pelos substratos.

À medida em que o substrato absorve água, o conteúdo sólido do filme aumenta e o adesivo se torna mais viscoso e pegajoso. A absorção de água (e até do agente aglutinante

em alguns casos) é mantida por forças capilares desenvolvidas nos poros do substrato até que seu conteúdo sólido aumente ao ponto em que o adesivo coalesça em um filme contínuo. A máxima resistência da junta é atingida quando toda a água presente no filme de adesivo e nos substratos evapora.

### **5.3 Escolha do método de aplicação do adesivo**

A aplicação de adesivos em emulsão por métodos convencionais requer que pelo menos um dos substratos apresente superfície porosa para permitir a evaporação da fase aquosa do adesivo. A aplicação pode envolver diversas abordagens, incluindo o uso de roda, extrusoras, spray, rolo, troca-tintas (*dauber*) ou cabeçote de impressão dependendo de demandas específicas em termos de reologia. Assim, é importante assegurar que o comportamento reológico do adesivo é compatível com o equipamento de aplicação empregado (PACKHAM, 2005).

Endoh (2014) apresenta uma solução para a aplicação do adesivo baseada no princípio de nebulização. Nesta, um venturi realiza a sucção do ar que é então misturado ao adesivo e o fluido resultante é bombeado a um bocal responsável pelo devido espalhamento do adesivo na superfície do papel.

Foram realizados testes preliminares com um borrifador comum, cola branca e folhas de papel sulfite, entretanto, devido à elevada viscosidade da cola branca comercial não foi possível formar uma nuvem fina de adesivo de modo que toda a superfície do papel fosse igualmente molhada.

Em seguida procedeu-se com a diluição da cola branca em água para reduzir seu teor de sólidos a 20%, 15% e 10%. Os adesivos foram novamente testados com o borrifador e apenas a formulação com 10% de sólidos foi devidamente nebulizada, porém a diluição se mostrou excessiva e não ocorreu adesão entre as folhas. Além disso, o exame do borrifador mostrou um acúmulo de material sólido na saída do bocal de aspersão, causado pela estricção no local. Assim, devido à dificuldade e complexidade envolvidas na previsão do comportamento reológico do adesivo, que é formado por um material polimérico em emulsão, a solução baseada em princípios de nebulização foi descartada.

### **5.4 Análise morfológica**

Como exposto em Pahl (2007), na busca por princípios de solução é possível dividir problemas ou funções em subproblemas e subfunções passíveis de serem resolvidos individualmente. Quando a solução para cada subproblema é encontrada, a combinação sistemática das soluções leva à solução geral.

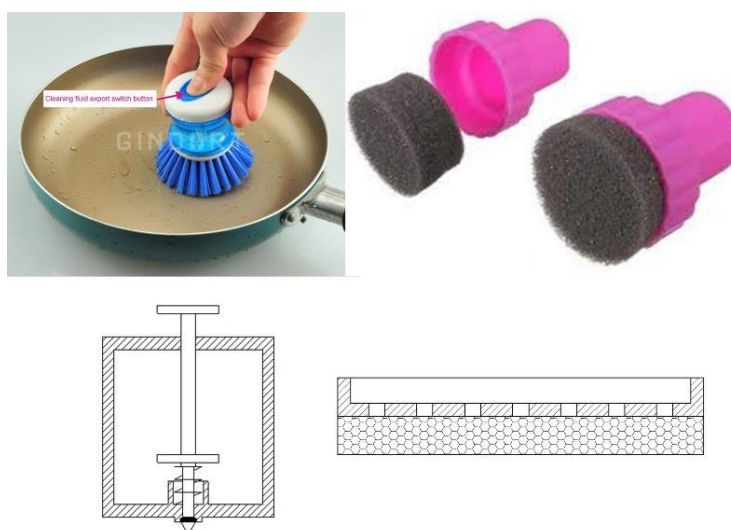
A **Tabela 7** apresenta a matriz morfológica proposta por Endoh (2014) adaptada com novos princípios de solução para a aplicação do adesivo: rolo, troca-tintas e *doctor blade*. Os princípios derivam das possíveis abordagens para a aplicação de adesivos em emulsões citadas anteriormente.

**Tabela 7** Matriz morfológica com novos princípios de solução para aplicação do adesivo. Adaptado de Endoh (2014).

Função/Solução	1	2	3
A Alimentação de material			
(...)	(...)	(...)	(...)
H Fixação do protótipo			Junção Química
J Aplicação do adesivo			
K Compactação do papel			
(...)	(...)	(...)	(...)

Por meio do exercício da analogia, é possível identificar os principais desdobramentos que a escolha de cada solução implicará. A solução 1 requer a movimentação horizontal de um eixo de modo que um rolo de material absorvente, previamente molhado pelo adesivo e posicionado no eixo rotacione sobre o comprimento do papel. A solução 2 envolve a movimentação vertical de uma superfície porosa que deverá ser pressionada contra o papel para que ocorra a transferência do adesivo. A solução 3 requer a movimentação horizontal de uma lâmina de modo que esta arraste e espalhe o adesivo previamente depositado em certas regiões do papel.

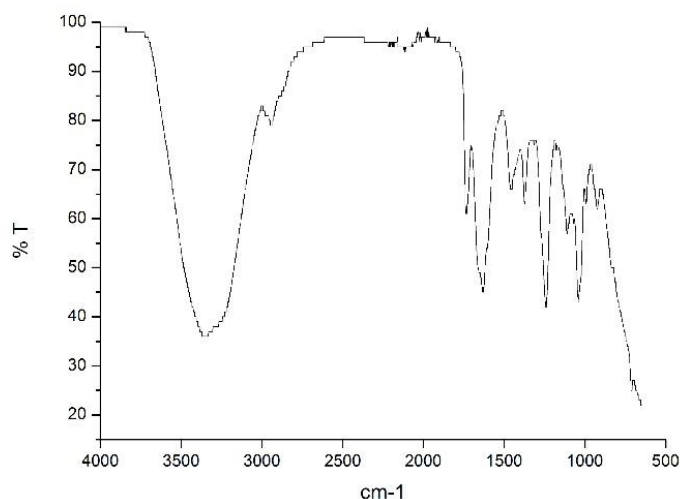
Para os fins a que se designam este trabalho, a solução 2 foi considerada potencialmente mais simples, devido a existência de dispositivos semelhantes com funcionamento puramente mecânico e por poder ser implementada com pouca ou nenhuma automação. A **Figura 18** mostra os dispositivos e princípios, que inspiraram o conceito da solução.



**Figura 17** Dispositivos com liberação controlada de líquido e respectivos princípios de solução análogos.

### 5.5 Ensaio de Descascamento-T

Após a identificação do princípio por meio do qual o dispositivo deverá depositar o adesivo sobre as camadas de papel, a composição química de uma amostra do adesivo usado na máquina *Mcor Iris* foi investigada por espectroscopia no infravermelho. Como pode ser notado na **Figura 19**, o espectro mostra absorção da radiação em comprimentos de onda próximos a  $3400\text{ cm}^{-1}$  e  $1100\text{ cm}^{-1}$ , correspondentes à frequência de estiramento das ligações O-H e C-O presentes nos álcoois.



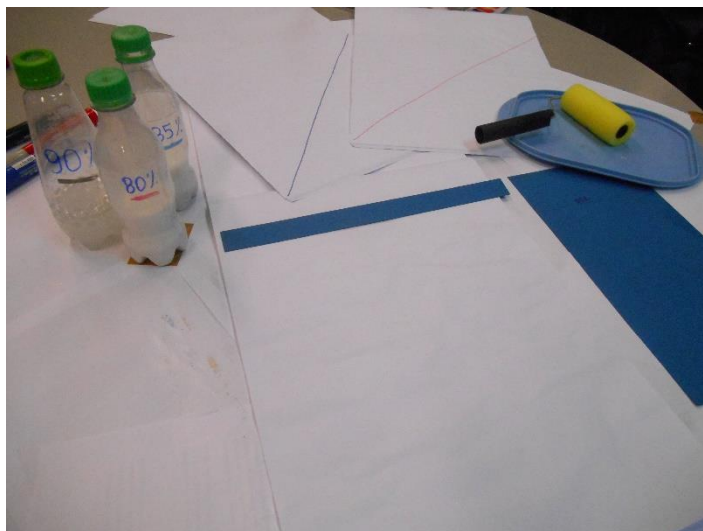
**Figura 18** Espectro IV da amostra do adesivo usado na impressora *Mcor Iris*

O processo de engenharia reversa do adesivo usado na máquina comercial, apesar de não revelar sua formulação exata, possibilitou a elaboração de três formulações com uso cola branca como base e etanol como solvente de modo a diminuir a viscosidade da cola branca sem aumentar seu teor de água. As formulações estão indicadas na **Tabela 8**.

**Tabela 8** Formulações dos adesivos desenvolvidos.

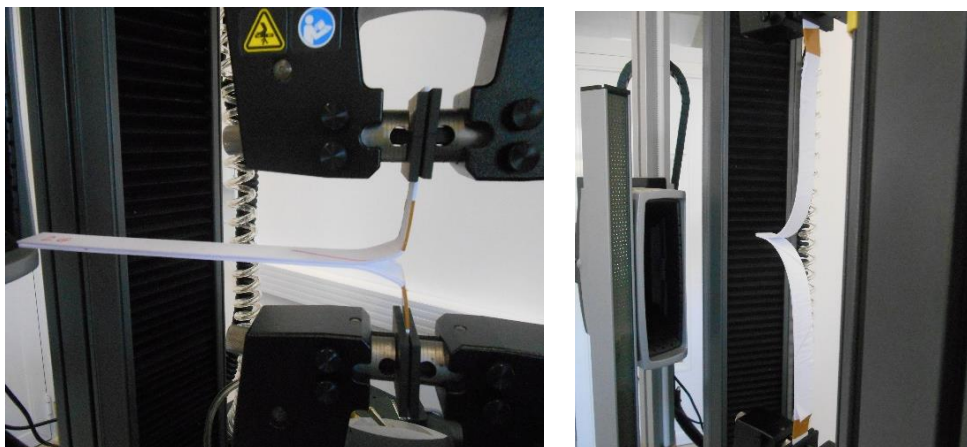
Formulação		Adesivo a Produzir (g)	Massa Líquido (g)	Cola Branca (g)	% Sólidos na Cola Branca	PVA na Cola Branca (g)	Água na Cola Branca (g)	Etanol Adicionado (g)
% Sólidos no Adesivo Formulado	0,20	150,00	120,00	130,43	0,23	30,00	100,43	19,57
	0,15	150,00	127,50	97,83		22,50	75,33	52,17
	0,10	150,00	135,00	65,22		15,00	50,22	84,78

Os adesivos foram aplicados sobre folhas de papel A3 até formar painéis laminados com espessura suficiente para que fossem fixados nas garras da máquina de ensaio. Por facilidade, optou-se por utilizar um rolo de espuma durante o processo de aplicação do adesivo, **Figura 20**, de modo a garantir o espalhamento de uma fina camada sobre toda a área do papel. A formulação de adesivo contendo 10% de sólidos não proporcionou adesão entre os substratos. Os painéis colados pelos adesivos com 15% e 20% de sólidos mostraram boa adesão após 24 horas de secagem.



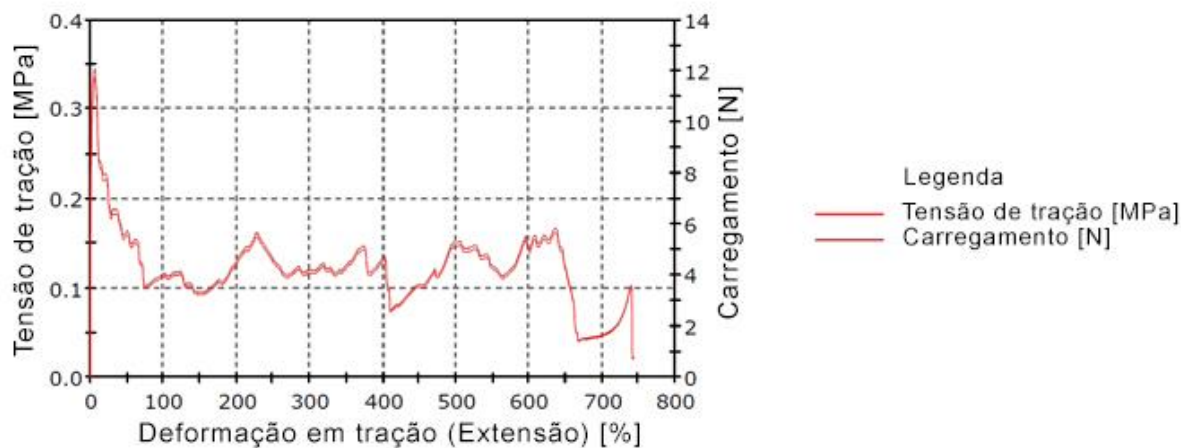
**Figura 19** Material utilizado na preparação dos painéis laminados.

Os corpos de prova foram preparados a partir dos painéis laminados de papel, formando dois substratos flexíveis de 152 mm de largura por 305 mm de comprimento, colados em até 241 mm de seu comprimento e cortados em tiras de 25 mm de largura, de modo as porções sem adesivo pudessem ser dobradas perpendicularmente à junta para fixação nas garras da Máquina Universal de Ensaio *Instron 5969*. O carregamento foi aplicado à velocidade constante de 254 mm/min no cabeçote de modo que a separação da junta ocorreu a 127 mm/min. Como exigido pela norma, foram testados 10 espécimes de cada adesivo. A **Figura 21** mostra a etapa inicial e final de um ensaio.

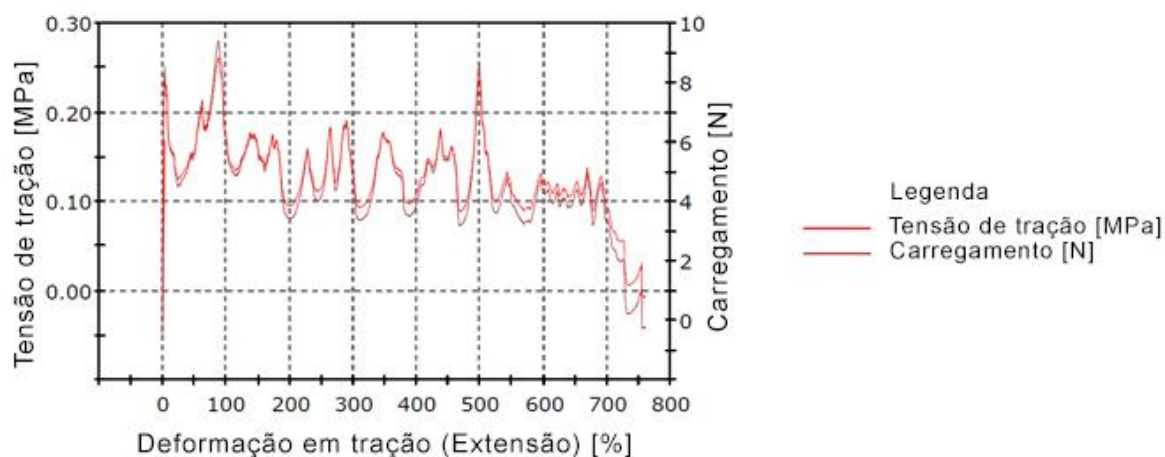


**Figura 20** Início e término do ensaio de descascamento-T para um dos corpos de prova.

Foram registradas as curvas de carregamento e tensão *versus* deformação, como visto na **Figura 22** e **Figura 23**. A partir das curvas registradas, determinou-se a carga média de descascamento por unidade de largura do corpo de prova (N/m) para os primeiros 127 mm de comprimento descascado após o pico inicial. Os resultados podem ser observados na **Tabela 9**.



**Figura 21** Gráfico Tensão x Deformação para corpo de prova laminado com adesivo contendo 15% de sólidos.



**Figura 22** Gráfico Tensão x Deformação para corpo de prova laminado com adesivo contendo 20% de sólidos.



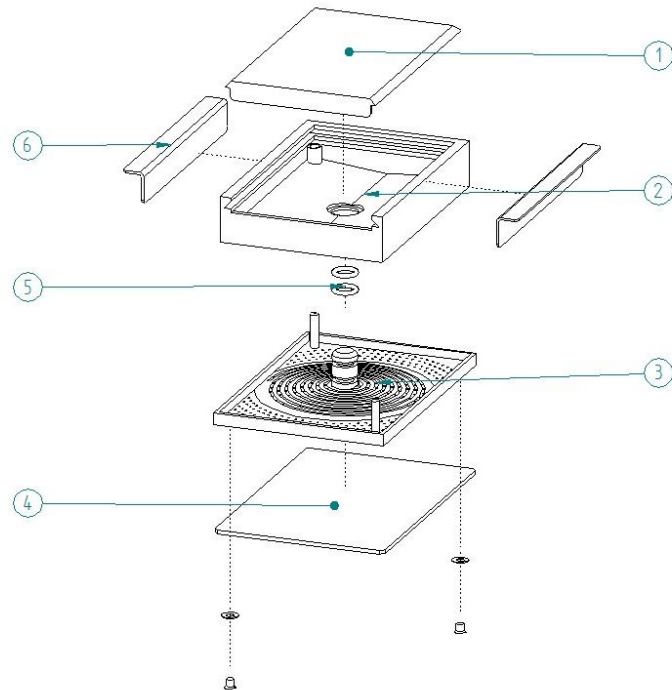
**Tabela 9** Resultados de resistência ao descascamento dos ensaios realizados.

Nº Espécime	Adesivo 0,15% sólidos	Adesivo 0,20% sólidos
	Resistência ao descascamento (N/m)	Resistência ao descascamento (N/m)
1	190,733	301,630
2	74,685	254,246
3	188,692	279,847
4	87,365	275,452
5	43,649	237,773
6	122,542	199,793
7	250,766	56,349
8	249,885	294,034
9	273,705	107,492
10	198,256	125,070
<b>Média</b>	<b>168,028</b>	<b>213,169</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,083</b>	<b>0,072</b>

A resistência média ao descascamento dos corpos de prova laminados com adesivo contendo 20% de sólidos foi de 213,169 N/m enquanto a dos corpos de prova laminados com adesivo contendo 15% de sólidos foi de 168,028 N/m. Além disso, os corpos de prova laminados com o adesivo mais concentrado mostraram menor grau de enrugamento, o que contribuiu para uma maior uniformidade durante os ensaios, ou seja, menor desvio padrão e menor ocorrência de delaminação.

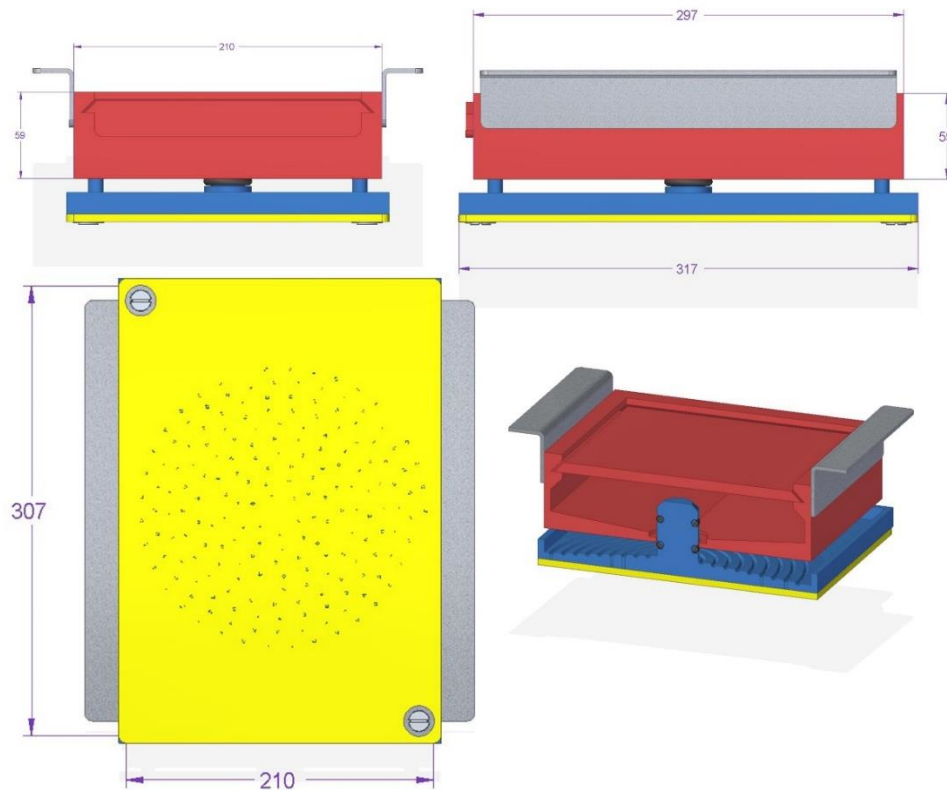
### 5.6 Solução Construtiva do Dispositivo de Aplicação de Adesivo

A **Figura 23** mostra a solução construtiva para o dispositivo de deposição de adesivo, projetado com o *Solid Edge ST7*. O conjunto é formado por um *dispenser* (2) de adesivo com tampa (1) deslizante que é fixado ao teto da impressora por meio de duas placas (6). Abaixo do *dispenser* situa-se uma bandeja (3) com inúmeros canais através dos quais o adesivo pode fluir, enchando uma esponja (4) que é fixada na face inferior da bandeja. A bandeja possui um eixo central no qual são inseridos dois *orings* (5) que têm por finalidade limitar o curso de sua movimentação vertical, selando o *dispenser* de adesivo.



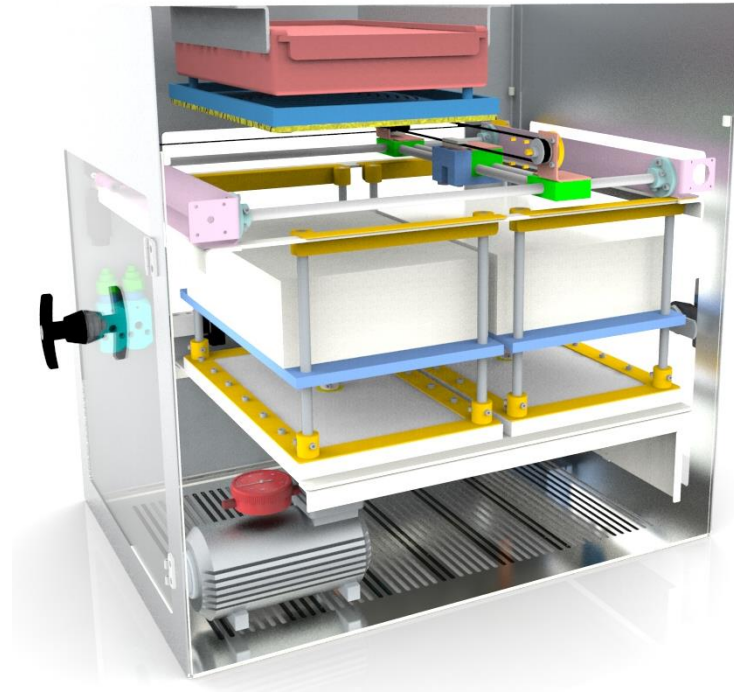
**Figura 23** Componentes do dispositivo de deposição de adesivo.

Para que o adesivo molhe a esponja, a mesa contendo o material de construção deve ser elevada de modo a deslocar o *oring* superior, empurrando-o para cima, para que o adesivo flua através da folga entre o eixo da bandeja e o furo do *dispenser*. O movimento da bandeja distribuidora é alinhado por duas guias diagonalmente inseridas no *dispenser* de adesivo. A **Figura 24** mostra o dispositivo nas vistas ortogonais e uma perspectiva em corte, evidenciando o espaço destinado a reservar o adesivo líquido.



**Figura 24** Vistas ortogonais e perspectiva em corte do dispositivo de aplicação do adesivo.

O adesivo percorre os sulcos da bandeja distribuidora, vazando pelos canais até chegar à esponja. O fluxo de adesivo é interrompido quando o movimento de subida da mesa faz com que o *oring* inferior feche a folga entre o furo e o eixo. A quantidade de adesivo liberada pode ser controlada de acordo com o tempo entre a abertura e o fechamento da folga. A força exercida pelo conjunto contra o material de construção ajuda a compactar o laminado. O dispositivo é posicionado sobre a plataforma de construção dos protótipos, sendo fixado ao teto da impressora como mostrado na **Figura 25**.

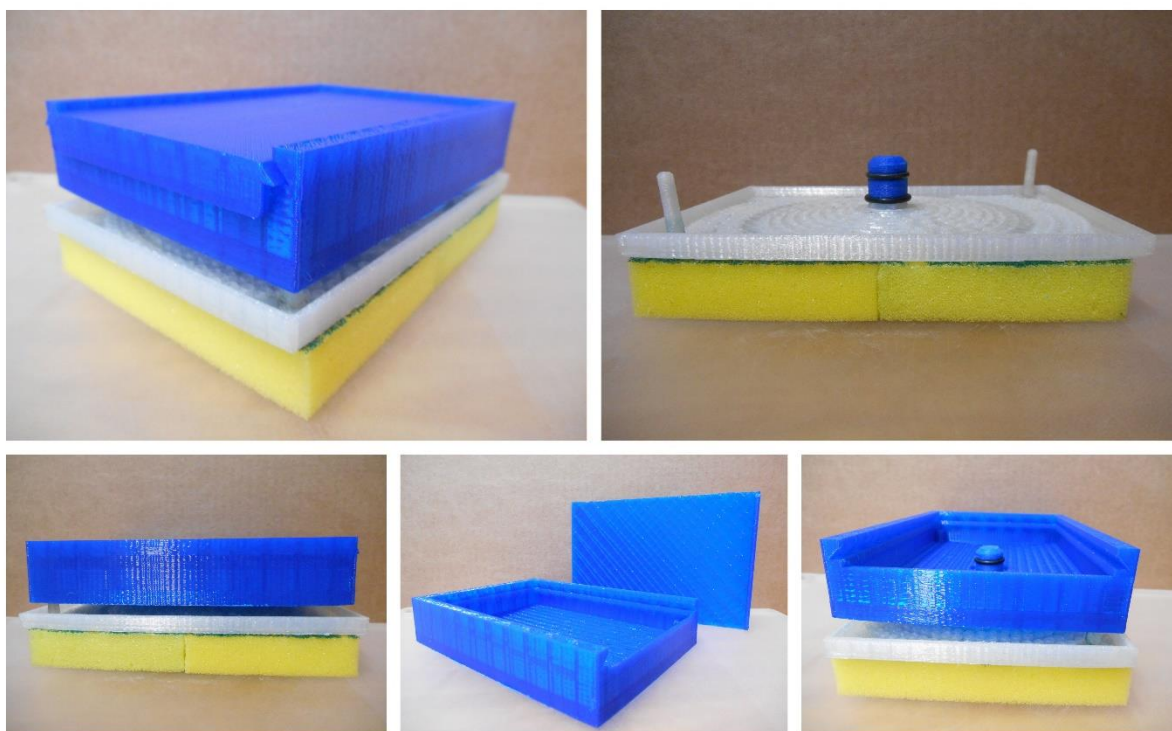


**Figura 25** Renderização do aspecto final da impressora, mostrando posicionamento do dispositivo de deposição de adesivo. Adaptado de Endoh (2014).

A sequência indicada para construção do modelo é deposição-corte: na primeira etapa, a mesa vazia é pressionada contra a esponja, recebendo uma camada de adesivo. A primeira folha de papel é posicionada sobre a mesa e depois cortada de acordo com as informações da camada. Uma vez cortada, a primeira camada é pressionada contra a esponja, sendo assim compactada e recebendo uma camada de adesivo em sua face superior. Uma nova folha é posicionada sobre a anterior e a sequência se repete até que o objeto seja totalmente impresso.

## 6 GERAÇÃO DO *MOCK-UP* E PROJETO CONCEITUAL DA IMPRESSORA 3D

Para fabricação do mock-up em escala 1:2, mostrado na **Figura 26**, foi utilizada a impressora 3D Cloner DH, que utiliza a tecnologia FDM para produzir objetos de até 320 x 210 x 400 mm em PLA. O programa utilizado para geração camadas foi CloneGen3D, com espessura de camada de 0,25 mm e preenchimento retilíneo de 10%. O tempo total necessário para produzir todos os componentes do conjunto foi de aproximadamente 8 horas e o custo calculado do material utilizado no dispositivo foi de USD 3,66.



**Figura 26** *Mock-up* do dispositivo de disposição de adesivo.



## 7 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O uso da manufatura aditiva na fabricação de peças e conjuntos industriais, bens de consumo e aplicações recentes na área de saúde, principalmente na geração de próteses e órteses, bem como engenharia tecidual já é uma realidade. Os avanços nas áreas de ciência e engenharia de materiais e controle permitirão, em um futuro próximo, obter de fato, objetos gerados de forma tridimensional e, não camada a camada.

Entretanto, novas tecnologias podem e devem ser incluídas, quando possíveis, no contexto do ensino superior, tecnológico, médio e básico. Esse trabalho apresenta um estudo de viabilidade técnica e proposta do projeto conceitual de uma impressora 3-D portátil, baseada na tecnologia LOM, que deve apresentar baixo custo utilizando como matéria-prima, papéis de escrita e impressão descartados em ambientes escolares, e até mesmo de escritório.

Um estudo sobre a fabricação e uso de papéis em países em desenvolvimento, indica um crescimento no Brasil, que traz também questões de impacto ambiental, com geração de resíduos. Portanto, o uso do papel como matéria-prima apresenta duas contribuições significativas: inserir o conceito de manufatura aditiva em ambiente escolar e oferecer uma alternativa de reuso do papel descartado na forma de material didático.

No desenvolvimento de soluções alternativas para problemas técnicos, o uso de metodologia de projeto direciona de forma sistemática as decisões tomadas, principalmente durante o projeto conceitual. Neste trabalho, o uso da análise de variantes de solução se mostrou adequado para a escolha do adesivo, bem como permitiu um conhecimento mais aprofundado sobre a tecnologia de adesivos. Em relação ao projeto conceitual do mecanismo, a escolha do adesivo mais viável e do método de aplicação permitiu explorar diferentes princípios de deposição.

Uma vez gerado o *mock-up* do mecanismo de deposição, serão feitos testes de funcionalidade, como por exemplo, de movimentação do *dispenser* em relação à bandeja e avaliação da uniformidade de distribuição do adesivo no sistema formado pela bandeja e esponja. Por fim, deve-se avaliar a qualidade do laminado de papel que estruturará o protótipo rápido.





## REFERÊNCIAS

A atividade de reciclagem de papel no Brasil. BNDES. Disponível em: <[http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/seminario/florestal17.pdf](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/seminario/florestal17.pdf)>. Acesso em: 17 jun. 2015.

American Society for Testing Materials – **ASTM D1876 – Standard Test Method for Peel Resistance of Adhesives (T-Peel Test)** – Elaboração ASTM International, 2008.

CALDEIRA, M. F. T. H. S. A. **A importância dos materiais para uma aprendizagem significativa da matemática**. 2009. Tese de doutorado. Facultad de Ciencias de la Educación, Universidad de Málaga.

DERKACH, S. R. **Rheology on the Way from Dilute to Concentrated Emulsions**. International Review of Chemical Engineering, v. 2, n. 3, mai 2009.

EBNESAJJAD, S. **Adhesives Technology Handbook**. New York: William Andrew, 2008.

ENDOH, R. **Desenvolvimento do projeto de uma impressora 3-D experimental baseada na tecnologia LOM**. 2014. Trabalho de conclusão de curso. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Finite Engineering Solutions (Ireland). Conor MacCormack, Fintan MacCormack. **An adhesive dispensing device**. GB 2 455 124 A, 3 jun 2009.

GIBSON, I.; ROSEN W. D.; STUCKER, B. **Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing**. New York: Springer, 2010.

KHOT, R. A; HJORTH, L.; MUELLER, F. F. **Understanding Physical Activity through 3D Printed Material Artifacts**. Chi, Toronto, 2014.

PACKHAM, D. E. **Handbook of adhesion**. West Sussex: Wiley & Sons, 2005.

PAHL, G. et al. **Engineering Design**. Springer, 2007.

PETRIE, E. M. **Handbook of Adhesives and Sealants**. McGraw-Hill Handbooks, 2006.

RELATÓRIO. Indústria brasileira de árvores. Pöyry Consultoria em Gestão de Negócios Ltda. Disponível em: < [http://www.iba.org/shared/iba\\_2014\\_pt.pdf](http://www.iba.org/shared/iba_2014_pt.pdf)>. Acesso em: 17 jun. 2015.

RELATÓRIO. Manufacturing the future: The next era of global growth and innovation. McKinsey&Company. Disponível em:

<[http://www.mckinsey.com/insights/manufacturing/the\\_future\\_of\\_manufacturing](http://www.mckinsey.com/insights/manufacturing/the_future_of_manufacturing)>.  
Acesso em: 17 jun. 2015.

RELATÓRIO. Paper Recycling. European Declaration on Paper Recycling. Disponível em: <  
[http://www.citpa-europe.org/sites/default/files/DeclarationonPaperRecycling\\_WebVersion.pdf](http://www.citpa-europe.org/sites/default/files/DeclarationonPaperRecycling_WebVersion.pdf)>. Acesso em:  
17 jun. 2015.

TISSARI, J. Highlights on paper and paperboard: 1999 – 2009. FAO Forestry Department.  
Disponível em: <  
[http://faostat.fao.org/Portals/\\_Faostat/documents/pdf/Paper%20and%20paperboard.pdf](http://faostat.fao.org/Portals/_Faostat/documents/pdf/Paper%20and%20paperboard.pdf)>.  
Acesso em: 17 jun. 2015.

ERPC, Paper Recycling Monitoring Report. 2013.  
[http://www.cepi.org/system/files/public/documents/publications/recycling/2014/WEB\\_monitoring%20report%202013.pdf](http://www.cepi.org/system/files/public/documents/publications/recycling/2014/WEB_monitoring%20report%202013.pdf)