Manufatura aditiva como ferramenta didática para a formação de profissionais da AEC

Additive manufacturing as a didactic tool for professional education in AECO

Márcio Henrique de Sousa Carboni
Universidade Federal do Paraná | Curitiba | Brasil | mhcarboni@ufpr.br
Sérgio Scheer
Universidade Federal do Paraná | Curitiba | Brasil | scheer@ufpr.br

Resumo
O potencial disruptivo da Manufatura Aditiva (AM) somado com as novas necessidades educacionais da sociedade do século XXI demandam programas educacionais inovadores. Esta Revisão Sistemática da Literatura (RSL) objetivou encontrar abordagens de utilização da AM na educação para se traçar possíveis paralelos com Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC), que ainda pouco se beneficia desta tecnologia. Os relatos apontam ganhos no processo de ensino-aprendizagem como: facilidade de entendimento de conceitos abstratos, estímulo para a construção do conhecimento centrado no aluno e a efetiva integração interdisciplinar. E conclui-se com um desenho dos elementos necessários para a proposição de um futuro modelo de colaboração na formação de profissionais da AEC.

Palavras-chave: Manufatura aditiva. Ensino interdisciplinar. Impressão 3D. Aprendizado baseado em problemas. PBL.

Abstract
The disruptive potential of Additive Manufacturing (AM) and the new educational needs of 21st century society calls for innovative educational programs. This Systematic Literature Review seeks to detect approaches to the use of AM in education in order to draw possible parallels with Architecture, Engineering and Construction (AECO), which still benefit little from this technology. The papers point gains in the teaching-learning process such as: ease of understanding abstract concepts, encouragement for construction of student-centered knowledge and effective interdisciplinary integration. We conclude with a design of the necessary elements for a collaboration model in education of AECO professionals.

Keywords: Additive manufacturing. Interdisciplinary education. 3D Printing. Problem-based learning. PBL.

INTRODUÇÃO

Devido aos recentes avanços da Fabricação Digital (FD) e Prototipagem Rápida (PR), novas possibilidades de experiências tridimensionais na arquitetura se tornaram possíveis. Tais tecnologias podem ser inseridas de maneira parcial ou integral no

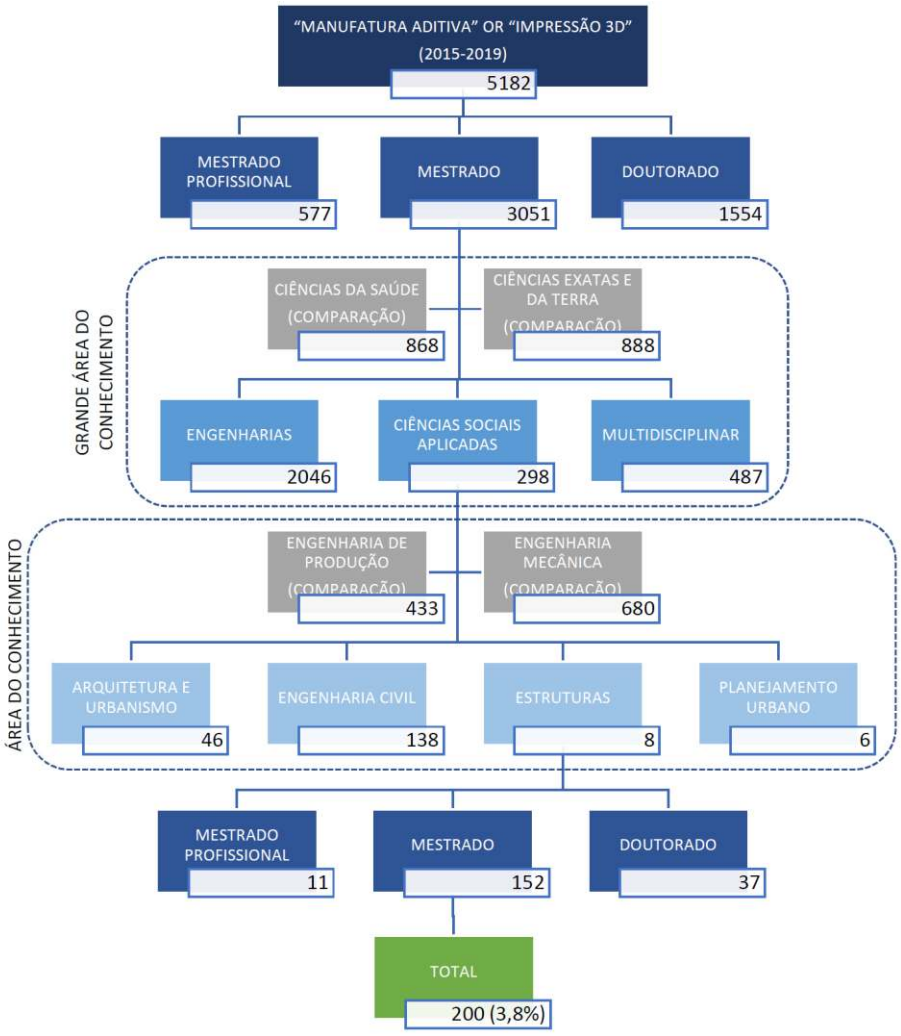
Como citar:
CARBONI, M. H. S.; SCHEER, S. Manufatura aditiva como ferramenta didática para a formação de profissionais da AEC. *In:* SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO, 3., 2021, Uberlândia. **Anais [...].** Porto Alegre: ANTAC, 2021. p. 1-14. Disponível em: https://eventos.antac.org.br/index.php/sbtic/article/view/567. Acesso em: 3 ago. 2021.

processo de projeto-construção da arquitetura, uma vez que podem atuar nas mais diferentes etapas [1].

Todavia, no Brasil, o uso da FD como técnica construtiva é insipiente pela pequena industrialização da área da AEC. É por isso que tais tecnologias são abordadas nos centros de ensino superior, para que haja a experimentação e formação de profissionais aptos a trabalhar com elas [1]. Mesmo assim, o tema não é consolidado dentro dos cursos de graduação da AEC.

Ao buscar os termos “manufatura aditiva” OR “impressão 3D”, em pesquisa realizada em dezembro de 2019 no portal de catálogo de teses e dissertações da CAPES, notou-se um pequeno número de trabalhos relacionados com AEC, somente 3,8% (Figura 1).

Figura 1: Catálogo de teses e dissertações CAPES por área do conhecimento



Fonte: os autores.

A Manufatura Aditiva (AM – *Additive Manufacturing*), ou Impressão 3D é uma das técnicas de PR que vem se destacando na última década. AM consiste no processo de fabricação de peças a partir de um modelo virtual CAD, através da deposição de camadas que vão sendo fabricadas sucessivamente até que se obtenha a geometria completa da peça [2][3].

O potencial disruptivo da AM demanda programas educacionais que forneçam seus princípios fundamentais e igualmente permitam aos designers e engenheiros descobrirem suas capacidades [2]. Tais capacidades devem estar alinhadas com as necessidades de uma educação voltada para uma sociedade baseada em informação e tecnologia e estão relacionadas às habilidades cognitivas[1] e não cognitivas[2] que devem ser estimuladas durante a formação de estudantes para que obtenham sucesso nas diversas áreas da vida [4]. Além disso, considera-se que experiências práticas e baseadas em problemas podem ajudar estudantes no entendimento de conceitos analíticos complexos. Para o sucesso futuro, alunos precisam praticar a resolução de problemas e tomada de decisão com embasamento, ao invés de apenas armazenar uma coleção de fatos e conteúdos [5].

Manufatura Aditiva tem potencial para que escolas explorem essas habilidades e competências, juntamente com estratégias pedagógicas como a abordagem PBL (*problem-based learning*). Permite transformar ideias em modelos tangíveis, ou seja, permite que os estudantes criem e construam o conhecimento conforme vão transformando ideias em modelos físicos que as representem [6]. Somado a isso, as tecnologias de impressão 3D podem servir como uma poderosa ferramenta educacional através da exposição dos alunos a ciclos interativos de design [7] que é central para a prática da engenharia e arquitetura.

Assim, este trabalho indaga: Como a AM pode auxiliar no processo de capacitação dos futuros profissionais da AEC para que atendam as expectativas da sociedade do século XXI? Em busca dessa resposta, realizou-se uma RSL para identificar como a AM está sendo utilizada na educação e abordada em cursos de áreas com as quais seja possível estabelecer um paralelo com a AEC.

Este trabalho faz parte de uma pesquisa de doutorado que tem o objetivo de desenvolver um método com uma estrutura conceitual de implantação da AM na formação de profissionais da AEC.

MÉTODO

A Revisão Sistemática da Literatura (RSL) foi realizada em agosto de 2019. Inicialmente selecionou-se três plataformas de busca cientifica e buscou-se os termos "*3D printing*" OR "*Rapid Prototyping*" OR "Prototipagem Rápida" OR "Impressão 3D". Foram realizadas sete etapas de filtragem (Tabela 1) para então obter uma seleção total de 71 artigos. Após a leitura dos resumos eliminou-se outros 22 trabalhos, que não possuíam foco com a área de pesquisa ou com o tema desejado. E então, efetuou-se a

[1] Habilidades cognitivas são aquelas competências mentais que são associadas à capacidade de processar dados e desenvolver estímulos de compreensão, percepção e integração de conceitos. Exemplos: criatividade, memorização, rapidez no processamento de informações, reflexão, interpretação, capacidade de foco e atenção.

[2] As habilidades não cognitivas são também conhecidas como competências socioemocionais e estão relacionadas com características pessoais do indivíduo. Exemplos: persistência, autocontrole, respeito, calma, otimismo, confiança, entusiasmo.

leitura completa de 49 artigos, que puderam ser classificados em 6 categorias, conforme Quadro 1.

Tabela 1: Filtros realizados e número de trabalhos encontrados

FILTRO	SCOPUS	SCIENCE DIRECT	ENGINEERING VILLAGE
"3D Printing" OR "Rapid prototyping" OR "Prototipagem rápida" OR "Impressão 3D"	53.238	24.488	29.168
Filtro temporal: 2015-2019	33.283	13.111	12.426
"Architecture" OR "Civil Engineering" OR "Design" OR "Arquitetura" OR "Engenharia civil"	24.555	11.336	5.773
"Teaching" OR "Learning" OR "Education" OR "Ensino" OR "Aprendizagem" OR "Educação"	3.949	2.524	743
Artigos em periódicos e eventos revisados por pares	3.468	1.920	743
Exclusão termos e áreas relacionados à Medicina, Matemática, Ciência da computação, Química, Farmácia, Biologia.	1.058	1.465	743
Leitura do Título	118	24	24
Disponibilidade de texto completo	46	24	12
TOTAL SEM DUPLICIDADE		71	
LEITURA COMPLETA APÓS RESUMO		**49**	

Fonte: os autores.

Quadro 1: Categorias identificadas nos trabalhos da RSL

CATEGORIA	**Nº DE ARTIGOS**	**REFERÊNCIAS**
Experiências na graduação/pós-graduação	16	[2], [3], [9], [14], [16], [17], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31].
Experiências no ensino básico	5	[32], [33], [34], [35], [36].
Experiências no ensino de professores	5	[7], [12], [37], [38], [39].
Métodos, modelos, diretrizes de ensino/aprendizado	9	[5], [10], [15], [18], [19], [20], [40], [41], [42].
Uso AM na educação	3	[13], [43], [44].
Uso e adoção da AM no mercado/indústria	11	[45], [46], [47], [48], [49], [50], [51], [52], [53], [54], [55].

Fonte: os autores.

RESULTADOS

INTERDISCIPLINARIDADE E ABORDAGEM DE ENSINO BASEADO EM PROBLEMAS

Na indústria da AEC cada vez mais se nota a necessidade da integração de profissionais para atingirem objetivos em comum com êxito e qualidade. Um exemplo claro dessa urgência apresenta-se nas discussões a respeito do BIM (*Building Information Modeling*) e a necessidade da interação, desde as fases iniciais, de todos os profissionais envolvidos no projeto, construção e operação de um edifício. É esperado que tal prática seja explorada e exercitada durante a formação desses profissionais.

Currículos escolares constituídos por compartimentos estanques, fragmentados e incomunicáveis produzem uma formação insuficiente para atender à sociedade que exige que ela seja cada vez mais crítica e competente [8]. E uma abordagem interdisciplinar pode contribuir de maneira mais eficaz para contrabalançar a

especialização, ampliando os horizontes e fornecendo uma consciência mais rica e global dos campos de aplicação dos métodos e técnicas de engenharia [9]. Dessa forma, a AM desperta interesse como ferramenta educacional justamente por admitir o ensino interdisciplinar, sala de aula invertida e abordagens de aprendizado prático [10].

Esta RSL identificou trabalhos que utilizam a AM na educação superior em disciplinas que unem alunos de diferentes cursos para desenvolverem um projeto comum, ou apontam abordagens que envolvem o trabalho em equipes do mesmo curso, e buscam respostas em diversas áreas, para solucionar um determinado problema. Tal abordagem é chamada de *Problem-based learning* (PBL), ou aprendizado baseado em problemas, e busca promover o engajamento do estudante com sua aprendizagem. Para a área da AEC, há outras abordagens mais próximas as práticas profissionais, como a *Project-based learning*, organizada em busca de objetivos compartilhados através de um projeto.

A resolução de problemas é ponto chave dessa estratégia de aprendizado trazendo o ensino mais próximo da realidade do estudante, o que gera um aprendizado mais significativo. “O problema deve estar conectado com a prática profissional, abrangendo conceitos de várias disciplinas, oferecendo um bom modelo para estudo, envolvendo uma grande quantidade de pessoas e contemplando um emaranhado de questões e subquestões” [11].

MANUFATURA ADITIVA NA EDUCAÇÃO

Para a área de AEC, a construção de modelos, é considerada uma parte de um processo maior que permite a designers, arquitetos e engenheiros entender a construtibilidade da criação de um artefato. Também permite aos alunos se comunicarem e demonstrarem ideias através de formas visuais, receber feedback uns dos outros, identificar erros e problemas e revisar o modelo se necessário [12]. Ou seja, prototipar não apenas assiste estudantes em tornar ideias abstratas em concretas, como também permite disseminar seus processos de criação e descobertas aos outros, para que assim todos aprendem a partir das experiencias de tentativa e erro de seus pares.

Pode-se afirmar que é possível integrar nos currículos o ensino sobre AM e o desenvolvimento de habilidades em impressão 3D de duas formas [13]: ativa, que envolve a criação de cursos e projetos com foco explícito em AM; e, passiva, que envolve o uso da AM como ferramenta de apoio para o ensino de outros conteúdos.

Nos artigos analisados nesta RSL identificou-se que a forma de integração dessa tecnologia, em sua maioria, é passiva. Buscam integrar a AM em disciplinas como ferramenta para estimular criatividade, interdisciplinaridade, tomada de decisão, e o aprendizado de conteúdos apoiando projetos PBL. Ainda que a maioria das experiências encontradas não estejam focadas exclusivamente no ensino de AM, um resumo dos objetivos didáticos referentes à impressão 3D encontrados nos trabalhos analisados é apresentado no Quadro 2.

Quadro 2: Objetivos didáticos para a manufatura aditiva

OBJETIVOS DIDÁTICOS	Nº DE REFERÊNCIAS	REFERÊNCIAS
Aprender e aplicar princípios de design para fabricação aditiva	3	[2], [16], [22].
Aprender e aplicar tecnologias de engenharia reversa ou técnicas de digitalização 3D	2	[9], [23].
Aprender fundamentos da AM e princípios básicos de operação	8	[2], [3], [17], [24], [23], [25], [26], [27].
Comparar técnicas de impressão 3D com prototipagem tradicional	2	[2], [28].
Entender desvios de mensuração entre modelo digital e impresso com tecnologia AM	1	[29].
Entender e aprender a selecionar técnicas de pós-processamento	1	[3].
Entender e reconhecer causas e irregularidade na produção de peças em impressoras 3D	2	[3], [17].
Entender processo completo de desenvolvimento de produto	1	[9].
Estimar propriedades mecânicas de peças impressas	3	[3], [17], [30].
Estimular competência criativa utilizando impressão 3D	1	[14].
Ganhar experiência na operação de máquinas de AM	6	[2], [16], [23], [24], [26], [29].
Identificar vantagens e/ou limitações de tecnologias AM	3	[3], [24], [30].

Fonte: os autores.

Outro ponto importante para a adoção da Manufatura Aditiva na educação é a infraestrutura disponível aos alunos. O ambiente educacional também deve ser considerado em conjunto com abordagens educacionais para propiciar a criatividade. Ainda que tenha várias definições, criatividade está relacionada com a capacidade do pensamento divergente, ou seja, gerar múltiplas soluções a um problema. Metodologias baseadas em trabalho em grupo e o aprendizado baseado em projetos (PBL) somadas com um espaço que disponha de equipamentos e ferramentas (como laboratórios de prototipagem ou *makerspaces*), permitem explorar múltiplas e diferentes soluções a um mesmo problema de maneira rápida e dinâmica. Nos *makerspaces* se potencializa o pensamento reflexivo, analítico e crítico, procurando uma alfabetização tecnológica que converta os alunos em criadores, em lugar de serem usuários passivos e consumidores compulsivos dos distintos avanços tecnológicos [14].

DISCUSSÃO

Existem, majoritariamente, dois tipos de método de ensino [15]. O direto, centrado no professor e baseando-se principalmente na exposição de conteúdo didático, e o indireto, centrado no aluno que adquire habilidades e conhecimento pelo desenvolvimento ativo de competências. Pela pesquisa realizada, pode-se afirmar que a nova geração de profissionais necessita cada vez mais de uma formação indireta, na qual construam seu conhecimento e desenvolvam o pensamento crítico e habilidades como a de resolução de problemas.

Vale enfatizar que a RSL foi importante para afirmar a relevância da discussão a respeito da utilização da AM no ensino superior, ao encontrar inúmeros relatos

apontando ganhos no processo de ensino aprendizagem que mesclam AM e abordagens PBL, como maior interesse dos alunos, facilidade de entendimento de conceitos abstratos, estímulo para construção do conhecimento centrado no aluno e colaborativo entre seus pares, e possibilidade da efetiva integração interdisciplinar.

Os atuais cursos de graduação normalmente possuem exposição limitada quanto à impressão 3D [16]. Tradicionalmente possuem aulas expositivas que podem prover conhecimento teórico, porém, são necessárias experiências mais práticas necessárias para a formação da próxima geração de engenheiros. Todavia, poucos trabalhos apontam o uso da AM na área da construção civil. Cabe identificar paralelos das experiências de outras áreas que possam ser utilizados na AEC.

A maioria dos trabalhos encontrados buscam incorporar a AM em disciplinas de forma passiva, utilizando a AM como ferramenta de apoio para o ensino. Parece fazer sentido utilizar esse tipo de abordagem para a AEC, uma vez que o objetivo principal da capacitação desses profissionais não é a operação de equipamentos de fabricação digital, e sim capacitar profissionais que entendam a tecnologia, saibam como tirar proveito dela para solucionar problemas e estejam aptos a trabalharem em equipes multidisciplinares.

Uma das barreiras para a adoção da AM no ensino é a falta de familiaridade com a tecnologia [9], tanto dos alunos, quanto dos professores. Dessa forma, vários trabalhos apontam conteúdos importantes em disciplinas que visam utilizar impressão 3D, como a apresentação dos fundamentos de AM e as diferenças entre as técnicas, equipamentos e materiais. Entretanto, este conteúdo deve tomar apenas uma pequena parte da carga horária de uma disciplina, pois tão importante quanto o conhecimento teórico é a experiência prática. Para os cursos de graduação brasileiros, ao se pensar em uma disciplina que dispõem de carga horária entre 20 e 40 horas semestrais, as diretrizes de Violante [5] são interessantes quando sugerem abordar esses temas teóricos com atividades extra classe e abordagem EAD (ensino à distância). Enquanto pode-se utilizar a maior parte do tempo explorando o desenvolvimento de habilidades e de conhecimento através de experiências práticas em grupo, como apresentado por [17], [5], [2], e, se possível, com alunos mais experientes no uso da impressão 3D.

Uma das experiências encontradas [17] apresenta uma metodologia de desenvolvimento de habilidades interdisciplinares de engenharia viável de ser adotada como modelo para a capacitação de profissionais da AEC. O objetivo seria aproximar a universidade de empresas do mercado que apresentem demandas e desafios aos alunos, e que esses, em grupos que englobem indivíduos de vários cursos (e expertises complementares), desenvolvam soluções, as prototipem e as apresentem.

Tais constatações permitem uma reflexão a respeito da realidade da maioria dos cursos de arquitetura e engenharia civil brasileiros. Como há a falta de familiaridade com a AM e a limitação de carga horária para explorar exclusivamente conteúdo relacionado a manufatura aditiva, seria benéfica a união desses cursos com outros mais habituados a essa tecnologia, a exemplo do Bacharelado em Expressão Gráfica existente na Universidade Federal do Paraná, ou mesmo cursos de Design, em

disciplinas nas quais os discentes possam compartilhar seus conhecimentos com seus pares e somar suas expertises em projetos colaborativos e interdisciplinares. Tais alunos, já possuem em seu currículo conteúdo e carga horária mais expressiva em manufatura aditiva, e podem colaborar no ambiente da AEC, inclusive ensinando outros alunos, através da chamada aprendizagem por pares (*peer instruction*).

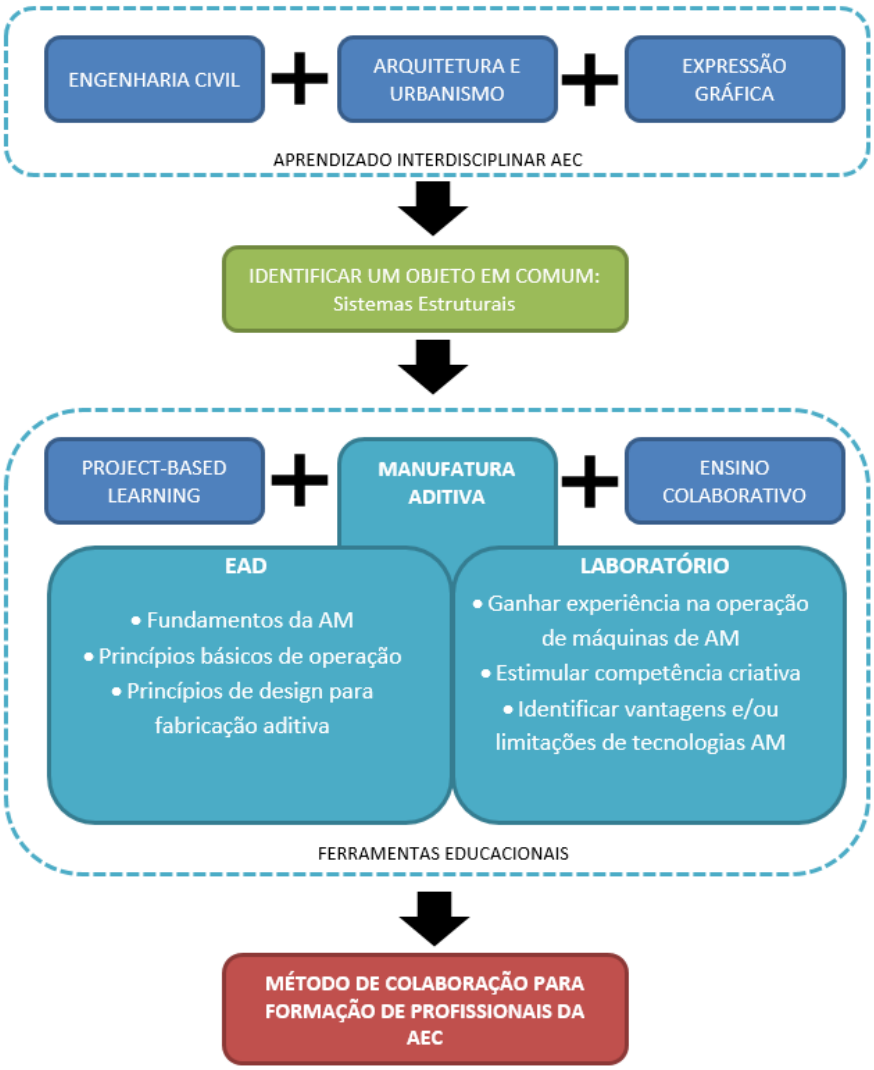
Contudo, imaginando uma disciplina com alunos de vários cursos relacionados com AEC, acredita-se que seja de fundamental importância tratar de alguns assuntos relacionados a AM de forma prática, como exemplo, o conceito de Design para Manufatura abordado por [2], [18], [19] e [20]. Mesmo entendendo os fundamentos básicos de funcionamento dos equipamentos de AM, é importante que os alunos saibam as características desejáveis para a modelagem de um objeto que será prototipado em uma impressora 3D, considerando principalmente o tempo e volume de impressão, quantidade de material utilizado, orientação da peça e necessidade de estruturas de suporte, além da qualidade da superfície da peça e necessidade de pós-processamento.

Na RSL, encontrou-se um modelo pedagógico adequado a essa configuração [18]. Primeiramente, é necessário ganhar a atenção dos alunos e ser claro nos objetivos da disciplina utilizando-se de exemplos e aplicações reais para, então, propor desafios que os capacitem de forma guiada, mas de maneira que eles próprios construam seu conhecimento. Durante esse processo, deve-se estimular o resgate de arcabouço teórico de diferentes naturezas e proporcionar situações em que os estudantes possam testar suas soluções, avaliá-las, reformulá-las, e testarem novamente.

No caso da busca de integração dos cursos da área AEC (Arquitetura e Urbanismo, Engenharia Civil e Expressão Gráfica), levanta-se uma hipótese sobre um tema que pode ser utilizado como "objeto em comum" e ponto de partida para se ganhar a atenção dos estudantes. Sugere-se o tema "sistemas estruturais", uma vez que é fundamental para o ensino de arquitetura, tema central para a engenharia civil e permite diversas abordagens que envolvam conhecimentos relativos à expressão gráfica, mesmo que não seja tópico abordado nesse curso de graduação.

Além disso, o modelo físico é o recurso mais debatido e recomendado em trabalhos publicados sobre o ensino de estruturas [21]. Eles permitem a visualização real dos fenômenos, demonstrando conceitos de forma intuitiva, fidedigna e palpável. Isso nos dá mais confiança de que unir tal conceito com manufatura aditiva seja uma estratégia adequada para a colaboração entre os diferentes cursos já expostos.

Figura 2: Elementos do modelo de colaboração na formação de profissionais da AEC



Fonte: os autores.

Realizada a RSL, a Figura 2 sintetiza a organização dos elementos identificados e que se julga necessários para atingir o objetivo maior da tese de doutorado na qual este trabalho está inserido, que é desenvolver um método de colaboração durante a graduação de profissionais da AEC que utilize a manufatura aditiva como uma ferramenta educacional, juntamente com abordagem PBL e ensino colaborativo, para que os alunos tenham experiências interdisciplinares mais próximas da prática profissional, e uma formação mais significativa e alinhada com as expectativas da sociedade do século XXI. Frisa-se a importância de explorar conceitos mais básicos e teóricos sobre manufatura aditiva de maneira EAD, para que haja mais tempo em laboratório para o efetivo manuseio dos equipamentos e desenvolvimento dos projetos colaborativos.

CONCLUSÃO

Neste trabalho identificou-se benefícios, limitações e exemplos da utilização da AM na graduação de futuros profissionais alinhados com as necessidades da sociedade do século XXI. Essa pesquisa não visa encerrar a discussão de como implantar essa

tecnologia nos cursos de AEC, mas sim buscar pistas de como fazê-lo. Pelas experiências encontradas, sugere-se que a maneira mais direta de se implantar a AM e integrar diferentes cursos de graduação seja criando disciplinas em comum que explorem o aprendizado interdisciplinar, utilizando abordagens pedagógicas como a PBL. Para isso, é necessário inicialmente identificar um objeto em comum que possa ser explorado pelos diferentes cursos, para que, utilizando a Manufatura Aditiva como ferramenta educacional e fator de integração e estímulo, os alunos desenvolvam suas habilidades de comunicação, colaboração, resolução de problemas, alfabetização tecnológica e autonomia, além do conhecimento técnico necessário para suas profissões.

AGRADECIMENTOS

Acesse mais informações dos trabalhos utilizados nesta RSL AQUI.

REFERÊNCIAS

[1] MARTINS, I. L.; PEREIRA FILHO, Z. R. A produção acadêmica sobre a fabricação digital nas escolas brasileiras de arquitetura e urbanismo. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 10, p. e019007, 2019.

[2] GO, J.; HART, A. J. A framework for teaching the fundamentals of additive manufacturing and enabling rapid innovation. **Additive Manufacturing**, v. 10, p. 76–87, 2016. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2016.03.001.

[3] STERN, A.; ROSENTHAL, Y.; DRESLER, N.; ASHKENAZI, D. Additive manufacturing: An education strategy for engineering students. **Additive Manufacturing**, v. 27, p. 503–514, Mai. 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.04.001.

[4] PELLEGRINO, J. W.; HILTON, M. L. **Education for life and work: Developing transferable knowledge and skills in the 21st century**. 2013.

[5] VIOLANTE, M. G.; VEZZETTI, E. Guidelines to design engineering education in the twenty-first century for supporting innovative product development. **European Journal of Engineering Education**, v. 42, n. 6, p. 1344–1364, 2017.

[6] TRUST, T.; MALOY, R. W. Why 3d print? The 21st-century skills students develop while engaging in 3d printing projects. **Computers in the Schools**, v. 34, n. 4, p. 253–266, 2017. DOI: https://doi.org/10.1080/07380569.2017.1384684.

[7] NOVAK, E.; WISDOM, S. Effects of 3d printing project-based learning on preservice elementary teachers' science attitudes, science content knowledge, and anxiety about teaching science. **Journal of Science Education and Technology**, v. 27, n. 5, p. 412–432, 2018.

[8] PIRES, M. F. DE C. Multidisciplinaridade, interdisciplinaridade e transdisciplinaridade no ensino. **Interface - Comunicação, Saúde, Educação**, v. 2, n. 2, p. 173–182, 1998.

[9] GATTO, A.; BASSOLI, E.; DENTI, L.; IULIANO, L.; MINETOLA, P. Multi-disciplinary approach in engineering education: learning with additive manufacturing and reverse engineering. **Rapid Prototyping Journal**, v. 21, n. 5, p. 598–603, Jul. 2015. DOI: https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2014-0134

[10] SONG, M. J. Learning to teach 3D printing in schools: how do teachers in Korea prepare to integrate 3D printing technology into classrooms? **Educational Media International**, v. 55, n. 3, p. 183–198, 2018.

[11] ELMÔR FILHO, G.; SAUER, L. Z.; ALMEIDA, N. N. DE; VILLAS-BOAS, V. **Uma nova sala de aula é possível: Aprendizagem ativa na educação em engenharia**. 1o ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

[12] SONG, M. J. The application of digital fabrication technologies to the art and design curriculum in a teacher preparation program: a case study. **International Journal of Technology and Design Education**, v. 30, n. 4, mai. 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/s10798-019-09524-6

[13] FORD, S.; MINSHALL, T. Invited review article: Where and how 3D printing is used in teaching and education. **Additive Manufacturing**, v. 25, p. 131–150, jan. 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.10.028

[14] BONET, A.; MEIER, C.; SAORÍN, J. L.; DE LA TORRE, J.; CARBONELL, C. Tecnologías de diseño y fabricación digital de bajo coste para el fomento de la competencia creativa. **Arte, Individuo y Sociedad**, v. 29, n. 1, p. 85–100, 2017.

[15] FERNANDES, S. C. F.; SIMOES, R. Collaborative use of different learning styles through 3D printing. *In:* INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE PORTUGUESE SOCIETY FOR ENGINEERING EDUCATION (CISPEE), 2., 2016, Vila Real, Portugal. **Proceedings [...]**. v. 63, p.1–8, 2016.

[16] SMITH, C. J.; MAHONEY, P. S.; TODD, I. 3D printing a jet engine: An undergraduate project to exploit additive manufacturing now and in the future. **Materials Today Communications**, v. 16, n. March, p. 22–25, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2018.03.006

[17] BEKKE, D. A.; MERSHA, A. Y. Practical methodologies for the development of the students' multidisciplinary engineering skills: A win-win cooperation for both universities and companies. *In:* INTERNATIONAL CONFERENCE ON RESEARCH AND EDUCATION IN MECHATRONICS, 19., 2018, Delft. **Proceeding[...]**. IEEE, 2018. p.117–120. DOI: https://doi.org/10.1109/REM.2018.8421804

[18] CHIU, P. H. P.; LAI, K. W. C.; FAN, T. K. F.; CHENG, S. H. A pedagogical model for introducing 3D printing technology in a freshman level course based on a classic instructional design theory. *In:* FRONTIERS IN EDUCATION CONFERENCE, 2015, El Paso. **Proceedings[...]**. IEEEE, 2015. p.1–6. DOI: https://doi.org/10.1109/FIE.2015.7344287

[19] LYNN, R.; SALDANA, C.; KURFESS, T.; et al. Toward Rapid Manufacturability Analysis Tools for Engineering Design Education. *In:* NORTH AMERICAN MANUFACTURING RESEARCH CONFERENCE (NAMRC 44), 44., 2016, Blacksburg. **Proceedings[...]**. Elsevier Procedia Manufacturing, v. 5, 2016. p. 1183–1196. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.093

[20] JUNK, S.; MATT, R. New approach to introduction of 3D digital technologies in design education. *In:* DESIGN CONFERENCE INNOVATIVE PRODUCT CREATION, 25., 2015, Haifa, Israel. **Proceedings [...]**. Elsevier Procedia, v. 36, 2015. p.35–40. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.01.045

[21] NÓBREGA, P. G. B. DA; NÓBREGA, S. H. S. DA. Engenheiro Civil X Arquiteto: Conflito No Aprendizado Das Estruturas. **Revista de Ensino de Engenharia**, v. 39, n. 1, p. 183–191, 2020.

[22] MINETOLA, P.; IULIANO, L.; BASSOLI, E.; GATTO, A. Impact of additive manufacturing on engineering education - Evidence from Italy. **Rapid Prototyping Journal**, v. 21, n. 5, p. 535–555, 2015.

[23] SAORÍN, J. L.; MELIAN-DÍAZ, D.; BONNET, A.; et al. Makerspace teaching-learning environment to enhance creative competence in engineering students. **Thinking Skills and Creativity**, v. 23, p. 188–198, 2017. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.tsc.2017.01.004

[24] JUNK, S.; MATT, R. Workshop Rapid Prototyping - A new approach to introduce digital manufacturing in engineering education. *In:* INTERNATIONAL CONFERENCE ON

INFORMATION TECHNOLOGY BASED HIGHER EDUCATION AND TRAINING, 2015, Lisboa. **Proceedings [...]**. IEEE, 2015. p.1–6. DOI: https://doi.org/10.1109/ITHET.2015.7217965

[25] LUNA, A.; CHONG, M. How to motivate the interest in Physics to Engineering students without dying in the attempt? *In:* IEEE WORLD ENGINEERING EDUCATION CONFERENCE (EDUNINE), 2018, Buenos Aires. **Proceedings [...]**. IEEE, 2018. p. 1–5. DOI: https://doi.org/10.1109/EDUNINE.2018.8450949

[26] FAN, F.; WO, S.; IM, T.; et al. A project-problem based learning approach for appreciating ancient cultural heritage through technologies. *In:* IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON TEACHING, ASSESSMENT, AND LEARNING FOR ENGINEERING (TALE), 2016, Bangkok. **Proceedings [...]**. IEEE, 2016. p. 65–69. DOI: https://doi.org/10.1109/TALE.2016.7851772

[27] WANG, C.; YAP, J. B. H.; LI, H.; et al. Topographical survey engineering education retrofitted by computer-aided 3D-printing. **Computer Applications in Engineering Education**, v. 26, n. 6, p. 2116–2130, 2018.

[28] GREENHALGH, S. The effects of 3D printing in design thinking and design education. **Journal of Engineering, Design and Technology**, v. 14, n. 4, p. 752–769, 2016.

[29] HAAVI, T.; TVENGE, N.; MARTINSEN, K. CDIO design education collaboration using 3D-desktop printers. *In:* CIRP DESIGN CONFERENCE, 28., 2018, Nantes. **Proceedings [...]**. Elsevier Procedia CIRP, v. 70, 2018. p. 325–330. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.277.

[30] VIRGIN, L. Enhancing the teaching of linear structural analysis using additive manufacturing. **Engineering Structures**, v. 150, p. 135–142, 2017. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.07.054

[31] LUDWIG, P. M.; NAGEL, J. K.; LEWIS, E. J. Student learning outcomes from a pilot medical innovations course with nursing, engineering, and biology undergraduate students. **International Journal of STEM Education**, v. 4, n. 1, 2017.

[32] BULL, G.; HAJ-HARIRI, H.; ATKINS, R.; MORAN, P. An educational framework for digital manufacturing in schools. **3D Printing and Additive Manufacturing**, v. 2, n. 2, p. 42–49, 2015. DOI: http://online.liebertpub.com/doi/10.1089/3dp.2015.0009

[33] HULEIHIL, M. 3D printing technology as innovative tool for math and geometry teaching applications. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 164, 2017.

[34] NEMORIN, S.; SELWYN, N. Making the best of it? Exploring the realities of 3D printing in school. **Research Papers in Education**, v. 32, n. 5, p. 578–595, 2017.

[35] STAVRIDI, S. Reforming abstract geometrical ideas through 3D printing: A proposal for experiential e-Making technology in creative education. *In:* IEEE INTEGRATED STEM EDUCATION CONFERENCE (ISEC), 7., 2017, Princeton. **Proceedings [...]**. IEEE, 2017. p.10–16. DOI: https://doi.org/10.1109/ISECon.2017.7910218

[36] ÇELIK, A.; ÖZDEMIR, S. Tinkering learning in classroom: an instructional rubric for evaluating 3D printed prototype performance. **International Journal of Technology and Design Education**. v. 30, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/s10798-019-09512-w

[37] CAIRNS, D. R.; CURTIS, R.; SIERROS, K. A.; BOLYARD, J. J. Taking professional development from 2D to 3D: Design-based learning, 2D modeling, and 3D fabrication for authentic standards-aligned lesson plans. **Interdisciplinary Journal of Problem-based Learning**, v. 12, n. 2, p. 9–12, 2018.

[38] SCHELLY, C.; ANZALONE, G.; WIJNEN, B.; PEARCE, J. M. Open-source 3-D printing technologies for education: Bringing additive manufacturing to the classroom. **Journal of Visual Languages and Computing**, v. 28, p. 226–237, 2015. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jvlc.2015.01.004

[39] VERNER, I.; MERKSAMER, A. Digital design and 3D printing in technology teacher education. *In:* DESIGN CONFERENCE INNOVATIVE PRODUCT CREATION, 25., 2015, Haifa,

Israel. **Proceedings [...]**. Elsevier Procedia, v. 36, 2015. p.182–186. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.041

[40] TSONGAS, K.; TZIMTZIMIS, E.; SYMEONIDOU, I.; et al. Computer aided design and 3D printing for STEAM education: a technical reference guide for teachers. *In:* PHOTONICS APPLICATIONS IN ASTRONOMY, COMMUNICATIONS, INDUSTRY, AND HIGH-ENERGY PHYSICS EXPERIMENTS, 2018, Wilga. **Proceedings [...]**. SPIE, v. 1080854, 2018. p.1-9. DOI: https://doi.org/10.1117/12.2504296

[41] KADHIM, N. M. S. M. New Technologies and Their Impact on the Development of Architectural Education. *In:* INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE OF ENGINEERING SCIENCEs, 1.; SCIENTIFIC CONFERENCE OF ENGINEERING SCIENCE (ISCES), 3., 2018, Diyala. **Proceedings[...]**. IEEE, 2018. p. 231–236. DOI: https://doi.org/10.1109/ISCES.2018.8340559

[42] HUANG, T. C.; LIN, C. Y. From 3D modeling to 3D printing: Development of a differentiated spatial ability teaching model. **Telematics and Informatics**, v. 34, n. 2, p. 604–613, 2017. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.tele.2016.10.005

[43] WONG, A.; PARTRIDGE, H. Making as Learning: Makerspaces in Universities. **Australian Academic and Research Libraries**, v. 47, n. 3, p. 143–159, 2016.

[44] PIETERSE, F. F.; NEL, A. L. The advantages of 3D printing in undergraduate mechanical engineering research. *In:* IEEE GLOBAL ENGINEERING EDUCATION CONFERENCE (EDUCON), 2016, Abu Dhabi. **Proceedings[...]**. IEEE, 2016. p.25–31. DOI: https://doi.org/10.1109/EDUCON.2016.7474526

[45] KIANIAN, B.; TAVASSOLI, S.; LARSSON, T. C.; DIEGEL, O. The adoption of additive manufacturing technology in Sweden. *In:* GLOBAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE MANUFACTURING – DECOUPLING GROWTH FROM RESOURCE USE, 13., 2015, Binh Duong New City – Vietnam. **Proceedings[...]**. Elsevier Procedia CIRP, v. 40, 2016. p. 7–12. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.036

[46] SCHNIEDERJANS, D. G.; YALCIN, M. G. Perception of 3D-printing: analysis of manufacturing use and adoption. **Rapid Prototyping Journal,** v. 24, n. 3, p. 510–520, 2018. DOI: https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2017-0056

[47] WU, P.; ZHAO, X.; BALLER, J. H.; WANG, X. Developing a conceptual framework to improve the implementation of 3D printing technology in the construction industry. **Architectural Science Review**, v. 61, n. 3, p. 133–142, 2018.

[48] BUCHANAN, C.; GARDNER, L. Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges. **Engineering Structures**, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.045

[49] MENOLD, J.; JABLOKOW, K.; SIMPSON, T. Prototype for X (PFX): A holistic framework for structuring prototyping methods to support engineering design. **Design Studies**, v. 50, p. 70–112, 2017. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.destud.2017.03.001

[50] BHARDWAJ, A.; JONES, S. Z.; KALANTAR, N.; et al. Additive manufacturing processes for infrastructure construction: A review. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 141, n. 9, p. 1-13, set. 2019. DOI: https://doi.org/10.1115/1.4044106

[51] GHAFFAR, S. H.; CORKER, J.; FAN, M. Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution. **Automation in Construction**, v. 93, p. 1-11, out. 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.005

[52] FUKUDA, T.; TOKUHARA, T.; YABUKI, N. A dynamic physical model based on a 3D digital model for architectural rapid prototyping. **Automation in Construction**, v. 72, p. 9–17, 2016. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2016.07.002

[53] VRANICH, A. Reconstructing ancient architecture at Tiwanaku, Bolivia: the potential and promise of 3D printing. **Heritage Science**, v. 6, n. 1, p. 1–20, 2018. Springer International Publishing. DOI: https://doi.org/10.1186/s40494-018-0231-0

[54] BAYAR, M. S.; AZIZ, Z. Rapid prototyping and its role in supporting architectural design process. **Journal of Architectural Engineering**, v. 24, n. 3, 2018.

[55] PÉREZ-PÉREZ, M. P.; GÓMEZ, E.; SEBASTIÁN, M. A. Delphi prospection on additive manufacturing in 2030: Implications for education and employment in Spain. **Materials**, v. 11, n. 9, 2018.