

Sistemas Máquina-Material Baseados em Manufatura Aditiva: Levantamentos e Análise Quantitativa Sobre o Estado da Arte

Paola Nogueira, Guilherme Canuto da Silva
Universidade Federal do ABC

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma investigação sobre o estado da arte da modelagem e simulação de sistemas Máquina-Material, os quais representam a transformação da matéria-prima através da análise do comportamento dinâmico do sistema. Procurou-se identificar o uso combinado de três disciplinas: sistemas dinâmicos, reologia e processos de fabricação, mais especificamente, processos de manufatura aditiva baseados em extrusão. Através do desenvolvimento do referencial teórico e análise do estado da arte, observou-se que não foram encontrados trabalhos que fizessem uso combinado das três disciplinas aqui citadas. As seções seguintes apresentam uma introdução sobre o tema, os desenvolvimentos, os resultados e discussões, a conclusão e sugestões para desenvolvimentos futuros.

Palavras-chave: metodologia da pesquisa, análise quantitativa, processos de fabricação, manufatura aditiva, reologia, sistemas dinâmicos.

INTRODUÇÃO

Problema de pesquisa

A conceituação e modelagem matemática dos problemas de transformação da matéria-prima em produtos diversos (processos de fabricação) apresenta limitações quanto a representação dos fenômenos/problemas investigados. Isto porque, através da abordagem clássica (difundida), tem-se um formalismo matemático advindo da observação e da experimentação, resultando muitas vezes em equações válidas para casos particulares. Em complemento, tal abordagem estabelece apenas relações entre variáveis de interesse, desconsiderando o comportamento dinâmico das mesmas e, conseqüentemente, dos fenômenos físicos envolvidos.

Para se modelar e simular uma operação de fabricação específica, faz-se o uso combinado de diferentes disciplinas. Assim, a partir da integração entre diferentes áreas do conhecimento obtém-se equações capazes de estabelecer relações entre certas variáveis.

Sabe-se ainda que para aplicações industriais, o processamento de materiais é feito com uso de máquinas e/ou equipamentos de alta tecnologia. Conseqüentemente, o modelo a ser simulado deve considerar o equipamento e o material a ser transformado.

Este trabalho tem como objetivo geral apresentar uma investigação a cerca do estado da arte sobre modelagem e simulação de sistemas aqui denominados de sistemas Máquina-Material. Estes sistemas são capazes de

representar a transformação da matéria-prima através da análise do comportamento dinâmico da variável de interesse. Para este levantamento específico, investigou-se os processos de manufatura aditiva baseados em extrusão.

Como objetivo específico procurou-se identificar o uso combinado de três disciplinas: sistemas dinâmicos, reologia e processos de fabricação, sabendo-se que as duas primeiras disciplinas fazem uso de equações diferenciais para modelar e simular o comportamento dinâmico de seus sistemas.

METODOLOGIA

O levantamento fez uso da metodologia proposta por Silva (2023). A metodologia apresenta 8 etapas: (1) definição do problema de pesquisa, (2) pesquisa exploratória, (3) pesquisa seletiva, (4) pesquisa analítica, (5) pesquisa interpretativa, (6) análise estatística, (7) atualização da pesquisa e (8) conclusão. A figura 1 apresenta esta metodologia e descreve cada uma das 8 etapas.

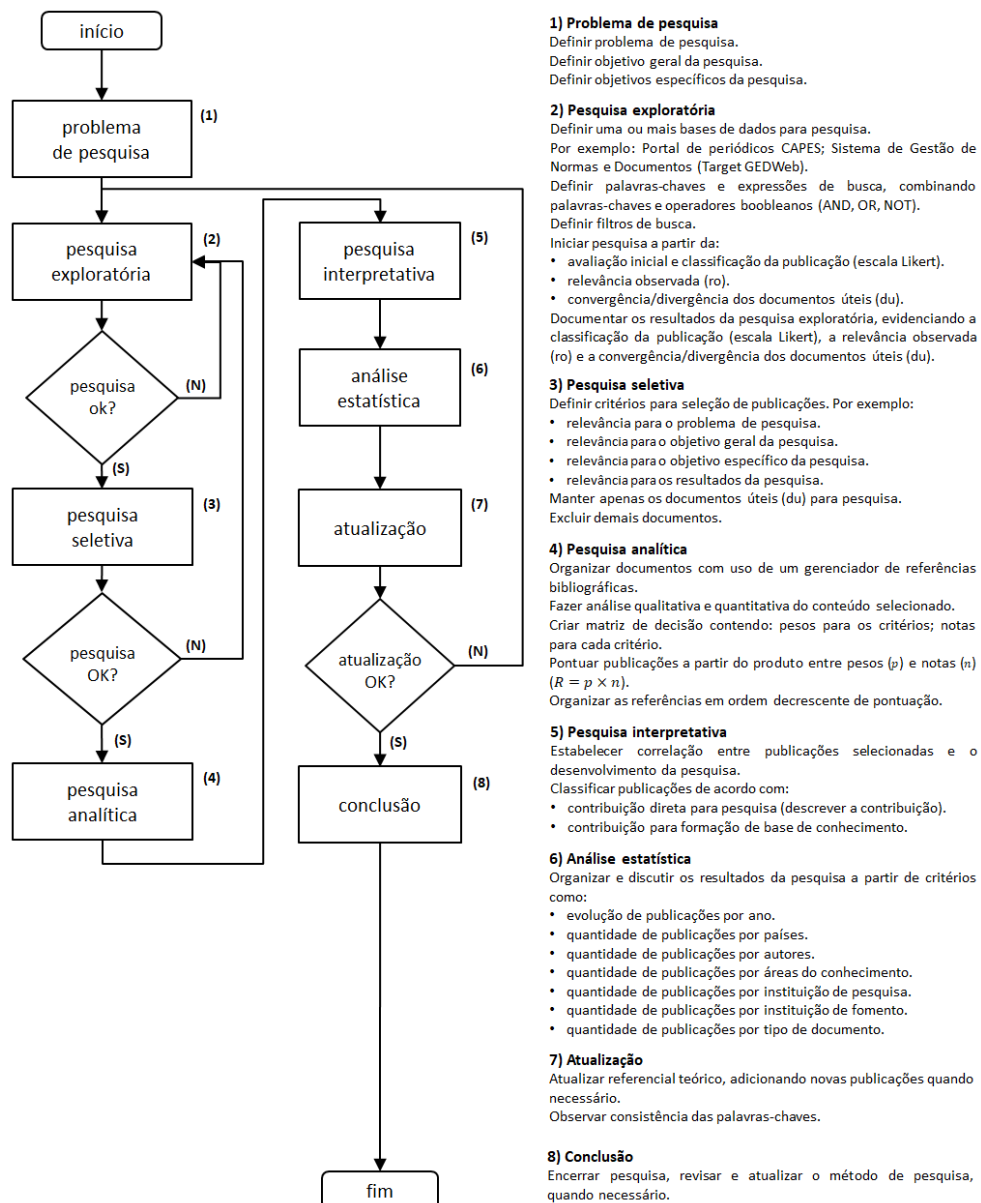


Figura 1. Metodologia de pesquisa (Silva, 2023).

DESENVOLVIMENTO

Pesquisa exploratória

A pesquisa exploratória fez-se uso das seguintes bases de dados: Scopus, Web of Science e SpringerLink. A partir disto, os seguintes filtros de busca foram escolhidos: intervalo de tempo, tipo de publicação e local de expressão. A tabela 1 apresenta as informações utilizadas para os respectivos filtros de busca.

Tabela 1. Principais filtros utilizados durante a busca.

ID	Filtro de busca	Scopus	Web of Science	SpringerLink
1	intervalo	2019 - atual	2019 - atual	2019 - atual
2	tipo de publicação	todos	todos	todos
3	local de expressão	all fields, title-abs-key	all fields, title-abs-key	all fields

A relevância da publicação se deu através da relevância observada (ro) e a convergência/divergência dos documentos úteis (du). Em complemento, utilizou-se ainda uma escala Likert para quantificar a relevância dos documentos encontrados. A figura 2 mostra os valores e a caracterização da relevância para escala Likert.

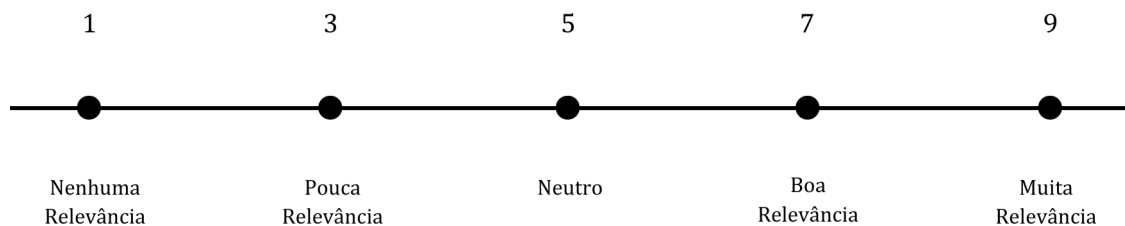


Figura 2. Escala Likert.

A partir disto, a tabela 2 mostra a quantidade de documentos encontrados e os respectivos valores para a relevância observada.

Tabela 2. Busca por principais áreas de estudo e filtro title-abs-key.

ID	Expressão de busca	Scopus	Web of Science	SpringerLink	Relevância
1	additive manufacturing	48.794	13.108	57.114	3
2	rheological models	11.214	869	16.857	3
3	dynamic models	301.933	18.814	586.086	1

Os resultados encontrados foram identificados como sendo de pouca relevância para a pesquisa. Para aprimorar a pesquisa exploratória, um processo de criação de expressões de busca foi feito. Este processo combinou palavras-chaves pertinentes ao tema tratado juntamente com operadores booleanos. A tabela 3 mostra os resultados encontrados.

Tabela 3. Busca utilizando palavras chaves.

ID	Expressão de busca	Scopus	Web of Science	SpringerLink	Relevância
1	(additive manufacturing) AND (dynamic systems)	565	2.985	15.844	1
2	(additive manufacturing) AND (rheology) AND (Dynamic systems)	3.714	90	901	3
3	(additive manufacturing) AND (rheology)	571	2.273	1.972	3
4	(additive manufacturing) AND (rheology) AND (extrusion) AND (polymer)	176	97	1.010	5
5	(additive manufacturing) AND (rheology) AND (extrusion) AND (polymer) AND NOT (concrete) AND NOT(ceramics)	97	84	393	5
6	(additive manufacturing) AND (rheology) AND (extrusion) AND (polymer) AND NOT (concrete) AND NOT(ceramics) AND NOT (powder) AND NOT (carbon)	48	65	76	5
7	(material extrusion additive manufacturing) AND (numerical modeling) AND (simulation) AND (rheology) NOT (ceramic) NOT (concrete) NOT (powder) NOT (silicone) NOT (carbon)	31	9	12	7-7-3*

*Com relação à expressão de busca número 7, a relevância observada para os resultados de cada uma das bases de pesquisa foram diferentes, sendo 7 para Scopus e Web of Science e 3 para SpringerLink. Para as demais expressões a relevância permaneceu a mesma.

Pesquisa seletiva

Prosseguindo com a etapa de pesquisa seletiva, alguns critérios foram definidos para a seleção dos documentos e, para cada um dos critérios, um peso também foi definido. Os critérios estão relacionados com o problema de pesquisa, o objetivo geral da pesquisa, os objetivos específicos da pesquisa e os resultados alcançados. A tabela 4 mostra os critérios e os pesos respectivos.

Tabela 4. Critérios e pesos para seleção de documentos.

Critérios	Sigla	Peso
problema de pesquisa	pp	2
objetivo geral da pesquisa	eg	3
objetivos específicos da pesquisa	oe	4
resultados alcançados	ra	1

Pesquisa analítica

Para atribuir uma nota em relação à aderência dos documentos com os critérios estabelecidos na tabela 4, definiu-se uma escala de números inteiros com um intervalo entre 1 (pouca aderência) e 5 (muita aderência). Após a exclusão dos documentos presentes em mais de uma base de dados, chegou-se a um total de 19 documentos úteis. A partir deste conjunto de informações, uma matriz de decisão foi criada. A tabela 5 mostra a matriz de decisão, considerando ainda a relevância observada.

Tabela 5. Matriz de decisão.

ID	Autor(es)/Ano	Título	Notas				Resultado	Relevância
			pp	og	oe	ra		
1	Mackay, M. (2018)	The importance of rheological behavior in the additive manufacturing technique material extrusion	3	4	3	4	34	9
2	Kattinger, J. et al. (2021)	Numerical simulation of the complex flow during material extrusion in fused filament fabrication	3	3	3	3	30	9
3	Agassant, J. et al. (2019)	Flow analysis of the polymer spreading during extrusion additive manufacturing	3	4	2	1	29	7
4	Serdeczny, M. et al. (2020)	Numerical modeling of the polymer flow through the hot-end in filament-based material extrusion additive manufacturing	3	3	3	2	26	7
5	Phana, D. et al. (2020)	Computational fluid dynamics simulation of the melting process in the fused filament fabrication additive manufacturing technique	3	3	2	2	25	7
6	Mishra, A. et al. (2021)	Implementation of viscosity and density models for improved numerical analysis of melt flow dynamics in the nozzle during extrusion-based additive manufacturing	3	3	2	2	25	7
7	Shadvar, N. et al. (2019)	Computational analysis of the extrusion process of fused deposition modeling of acrylonitrile-butadiene-styrene	2	3	2	1	22	5
8	Sanchez, L. et al. (2019)	Rheological approach for an additive manufacturing printer based on material extrusion	2	3	2	1	22	5

Continuação

ID	Autor(es)/Ano	Título	Notas				Resultado	Relevância
			pp	og	oe	ra		
9	Serdeczny, M. et al. (2022)	Viscoelastic simulation and optimisation of the polymer flow through the hot-end during filament-based material extrusion additive manufacturing	3	2	2	2	22	5
10	Yang, J. et al. (2023)	Multi-Stage Thermal Modelling of Extrusion-Based Polymer Additive Manufacturing	2	2	2	3	21	5
11	Das, A. et al. (2021)	Importance of Polymer Rheology on Material Extrusion Additive Manufacturing: Correlating Process Physics to Print Properties	3	2	1	2	18	5
12	Kazmer, D. et al. (2021)	Concurrent characterization of compressibility and viscosity in extrusion-based additive manufacturing of acrylonitrile butadiene styrene with fault diagnoses	2	2	1	2	16	5
13	Chen, J.; Smith, D. (2021)	Filament rheological characterization for fused filament fabrication additive manufacturing: A low-cost approach	1	2	1	3	15	3
14	Martini, M. et al. (2022)	An Outline of Fused Deposition Modeling: System Models and Control Strategies	2	2	1	1	15	3
15	Colon, A.; Kazmer, D.; Peterson, A. (2023)	The dependency chain in material extrusion additive manufacturing: Shaft torque, infeed load, melt pressure, and melt temperature	2	1	1	3	14	3
16	Fischer, J. et al. (2022)	In-line measurement of extrusion force and use for nozzle comparison in filament based additive manufacturing	2	1	1	2	13	3
17	Cole, D. et al. (2020)	Benchmark Physical Property Measurements for Material Extrusion Additive Manufacturing of Polycarbonate	1	1	1	1	10	3
18	Rashid, A.; Koç, M. (2022)	Experimental Validation of Numerical Model for Thermomechanical Performance of Material Extrusion Additive Manufacturing Process: Effect of Process Parameters	1	1	1	1	10	3
19	Arrigo, R.; Franche, A. (2022)	FDM Printability of PLA Based-Materials: The Key Role of the Rheological Behavior	1	1	1	1	10	3

Conclusão.

Os resultados apresentados na tabela 5 mostram que, dos 19 documentos úteis, apenas 6 deles apresentaram resultados iguais ou maiores que 25, 7 documentos apresentaram resultados entre 25 e 15 e os outros 5 documentos restantes, resultados menores que 15.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Pesquisa interpretativa

Dos 19 documentos analisados, os documentos que foram considerados mais relevantes obtiveram uma pontuação acima de 20. Estes documentos apresentaram uma abordagem de modelagem de processos de extrusão considerando características reológicas do material. Os documentos com pontuação abaixo de 20 foram mais específicos. Estes trabalhos também fizeram uso da reologia para modelar o processo de manufatura aditiva, contudo, apenas certas propriedades ou apenas resultados finais dos processos de transformação foram considerados.

Do conjunto de documentos analisados identificou-se uma ausência de trabalhos envolvendo o uso combinado das disciplinas sistemas dinâmicos, reologia e processos de fabricação. Os documentos aqui analisados trataram apenas do processo de extrusão e das características reológicas do material. Não há, portanto, uma modelagem completa do sistema Máquina-Material.

Análise Estatística

Para esta análise, as seguintes informações foram quantificadas: número de publicações por ano, país e instituição onde a pesquisa foi realizada, áreas de conhecimento envolvidas, relação entre relevância observada, documentos úteis e quantidade de publicações.

Conforme a metodologia proposta por Silva (2023), o desenvolvimento do referencial teórico se deu pela análise dos documentos e da utilização de parâmetros e filtros para se chegar em resultados satisfatórios. Então, com a aplicação de filtros adequados, a quantidade de documentos nas bases de dados diminuiu, resultando em documentos mais relevantes para o problema de pesquisa. Através da análise quantitativa da tabela 3, observou-se que, a cada expressão de busca, a quantidade de publicação diminuiu, porém, a relevância aumentou.

A figura 3 mostra a evolução de cada expressão de busca em relação a quantidade de documentos e relevância observado para as bases Scopus, Web of Science e SpringerLink respectivamente.

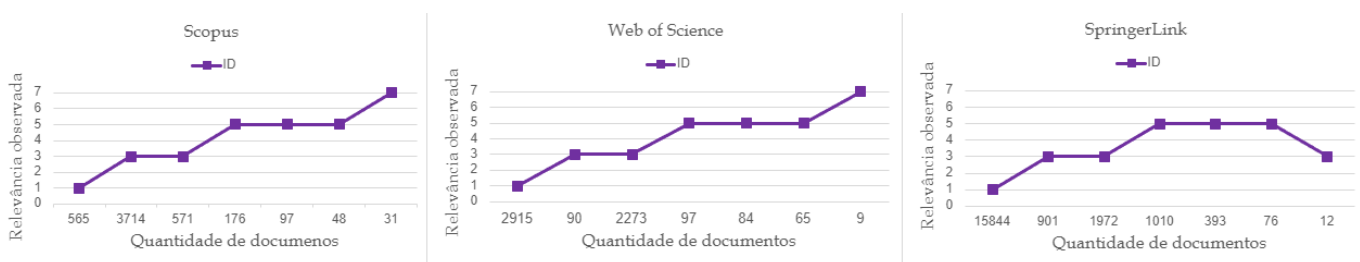


Figura 3. Relevância observada por expressão de busca: Scopus.

Somando-se a quantidade de documentos encontrados em cada uma das bases de dados para cada uma das expressões e fazendo uma média simples para a relevância da expressão 7, obteve-se o gráfico apresentado na figura 4.

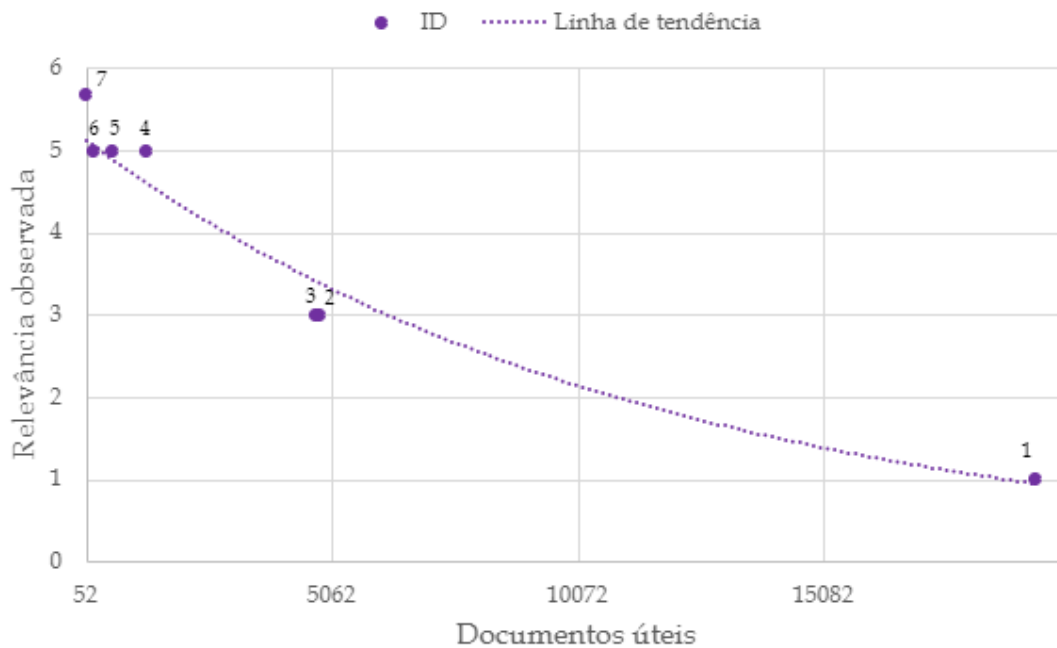


Figura 4. Relevância observada por expressão de busca.

Com base nas informações dos documentos da tabela 5, os gráficos das figuras 5, 6 e 7 foram gerados. A figura 5 apresenta a evolução de publicações por ano. Os anos de 2021 a 2022 foram os que mais retornaram documentos úteis, enquanto o ano de 2018 retornou apenas 1 documento, sendo este o de maior resultado (tabela 5, ID 1).

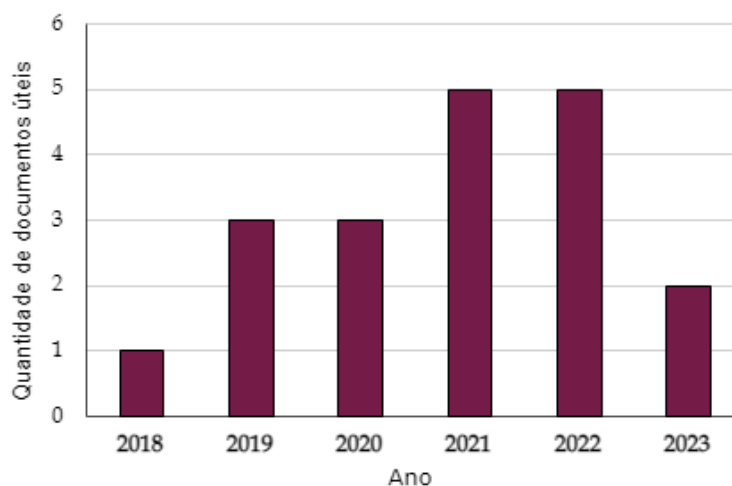


Figura 5. Evolução de documentos por ano.

Fazendo-se análise das publicações e os respectivos países onde as pesquisas foram desenvolvidas, percebe-se que a maior partes dos documentos, um total de 8, foram desenvolvidos nos Estados Unidos. Outros países também contribuíram, porém com no máximo 3 publicações, conforme a figura 6.

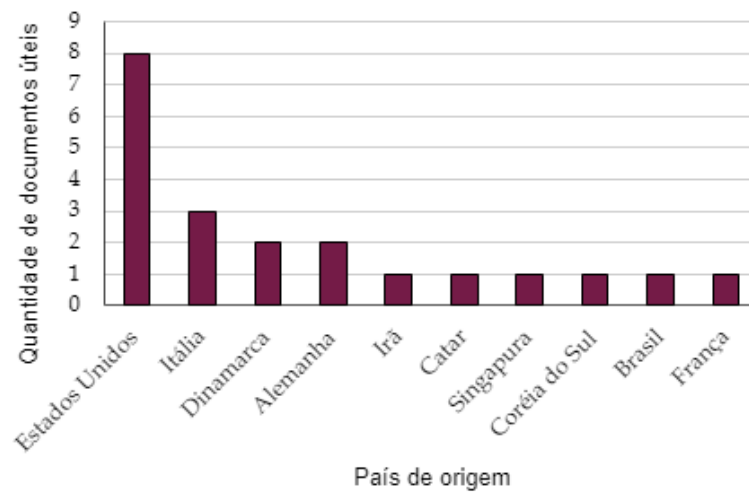


Figura 6. Documentos úteis e país de origem.

Os documentos estão distribuídos em diversas áreas de conhecimento e uma mesma publicação pode estar presente em mais de uma área. A figura 7 apresenta esta distribuição, mostrando que as áreas de conhecimento que mais aparecem são ciência dos materiais, por tratar de temas referentes à reologia, e engenharia, por abordar processos de modelagem e controle de um processo de fabricação.

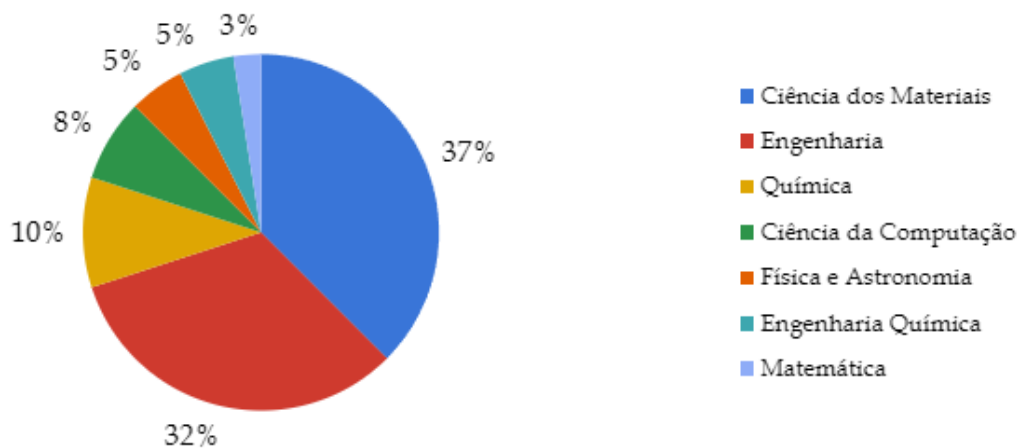


Figura 7. Distribuição de documentos úteis por áreas de conhecimento.

Complementar à análise de publicações e países de origem, foram separadas as nove primeiras instituições de pesquisa em número de publicações. Como esperado, 8 instituições se encontram nos Estados Unidos e 3 na Itália, ambos países são os de maiores contribuições para os documentos úteis, conforme tabela 6.

Tabela 6. Publicações entre instituições de pesquisa.

n.	Instituição de pesquisa	Quantidade
1	Technical University of Denmark	2
2	University of Delaware	2
3	University of Massachusetts Lowell	2
4	Shawnee State University	1
5	The University of Manchester	1
6	Baylor University	1
7	Army Research Laboratory	1
8	Politecnico di Milano	1
9	Politecnico di Torino	1
10	Istituto Italiano di Tecnologia	1

CONCLUSÃO

Com o problema de pesquisa definido e iniciando a pesquisa para desenvolvimento do referencial teórico, observou-se que quando não há aplicação de critérios e filtros, o número de publicações é maior do que quando há a utilização dos mesmos, além de se obter publicações mais relevantes para o tema de pesquisa.

Partiu-se de um total de 1.054.789 documentos (somando-se os documentos da tabela 2) de baixa relevância, para um total de 19 documentos relevantes para o problema de pesquisa, sendo alguns mais relevantes que outros segundo os critérios apresentados na tabela 4.

Através da pesquisa interpretativa, informações sobre os documentos úteis foram quantificadas, concluindo-se que a maioria das pesquisas que envolvem modelagem, manufatura aditiva e reologia foram realizadas nos Estados Unidos. Por fim, o levantamento sobre o estado da arte do tema não identificou trabalhos de modelagem e simulação contendo o uso combinado das disciplinas sistemas dinâmicos, reologia e processos de fabricação.

Para trabalhos futuros recomenda-se o desenvolvimento de um modelo Máquina-Material baseado em manufatura aditiva. O modelo pode contribuir para evidenciar a utilidade de se abordar os problemas de engenharia através de um formalismo moderno, integrado e capaz de representar a dinâmica das variáveis dos processos de transformação.

REFERÊNCIAS

AGASSANT, J.-F. et al. Flow analysis of the polymer spreading during extrusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, v. 29, p. 100794, out. 2019.

AL RASHID, A.; KOÇ, M. Experimental Validation of Numerical Model for Thermomechanical Performance of Material Extrusion Additive Manufacturing Process: Effect of Process Parameters. *Polymers*, v. 14, n. 17, p. 3482, 26 ago. 2022.

ARRIGO, R.; FRACHE, A. FDM Printability of PLA Based-Materials: The Key Role of the Rheological Behavior. *Polymers*, v. 14, n. 9, p. 1754, 26 abr. 2022.

CHEN, J.; SMITH, D. E. Filament Rheological Characterization for Fused Filament Fabrication Additive Manufacturing: A Low-Cost Approach. *Additive Manufacturing*, p. 102208, jul. 2021.

COLE, D. H. et al. AMB2018-03: Benchmark Physical Property Measurements for Material Extrusion Additive Manufacturing of Polycarbonate. *Integrating materials and manufacturing innovation*, v. 9, n. 4, p. 358–375, 1 dez. 2020.

COLON, A. R.; KAZMER, D. O.; PETERSON, A. M. The dependency chain in material extrusion additive manufacturing: shaft torque, infeed load, melt pressure, and melt temperature. *Additive Manufacturing*, v. 77, p. 103780–103780, 1 set. 2023.

DAS, A. et al. Importance of Polymer Rheology on Material Extrusion Additive Manufacturing: Correlating Process Physics to Print Properties. *ACS Applied Polymer Materials*, v. 3, n. 3, p. 1218–1249, 8 fev. 2021.

FISCHER, J. et al. In-line measurement of extrusion force and use for nozzle comparison in filament based additive manufacturing. *Progress in Additive Manufacturing*, v. 8, n. 1, p. 9–17, 12 jan. 2023.

KATTINGER, J. et al. Numerical simulation of the complex flow during material extrusion in fused filament fabrication. *Additive Manufacturing*, p. 102476, nov. 2021.

KAZMER, D. O. et al. Concurrent characterization of compressibility and viscosity in extrusion-based additive manufacturing of acrylonitrile butadiene styrene with fault diagnoses. *Additive Manufacturing*, v. 46, p. 102106, out. 2021.

MACKAY, M. E. The importance of rheological behavior in the additive manufacturing technique material extrusion. *Journal of Rheology*, v. 62, n. 6, p. 1549–1561, nov. 2018.

MARTINI, M. et al. An Outline of Fused Deposition Modeling: System Models and Control Strategies. *Applied Sciences*, v. 12, n. 11, p. 5400, 26 maio 2022.

MISHRA, A. A. et al. Implementation of viscosity and density models for improved numerical analysis of melt flow dynamics in the nozzle during extrusion-based additive manufacturing. *Progress in Additive Manufacturing*, 14 jul. 2021.

PHAN, D. D. et al. Computational fluid dynamics simulation of the melting process in the fused filament fabrication additive manufacturing technique. *Additive Manufacturing*, v. 33, p. 101161, maio 2020.

SANCHEZ, L. C. et al. Rheological approach for an additive manufacturing printer based on material extrusion. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 105, n. 5-6, p. 2403–2414, 30 out. 2019.

SERDECZNY, M. P. et al. Numerical modeling of the polymer flow through the hot-end in filament-based material extrusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, v. 36, p. 101454, dez. 2020.

SERDECZNY, M. P. et al. Viscoelastic simulation and optimisation of the polymer flow through the hot-end during filament-based material extrusion additive manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*, v. 17, n. 2, p. 205–219, 8 fev. 2022.

SHADVAR, N. et al. Computational analysis of the extrusion process of fused deposition modeling of acrylonitrile-butadiene-styrene. *International Journal of Material Forming*, v. 14, n. 1, p. 121–131, 26 dez. 2019.

SILVA, G.C. Metodologia da pesquisa para trabalhos de engenharia. (notas de orientação). Universidade Federal do ABC, 2023.

YANG, J. et al. Multi-Stage Thermal Modelling of Extrusion-Based Polymer Additive Manufacturing. *Polymers*, v. 15, n. 4, p. 838–838, 8 fev. 2023.

INFORMAÇÕES DE CONTATO

Paola Nogueira (autora de correspondência)

paola.luar@aluno.ufabc.edu.br

Guilherme Canuto da Silva

guilherme.canuto@ufabc.edu.br