

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

INDICADORES DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA PARA PROSPECÇÃO
TECNOLÓGICA EM MANUFATURA ADITIVA DE BIOCERÂMICAS

André Candido Porto

São Carlos-SP
2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS

INDICADORES DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA PARA PROSPECÇÃO
TECNOLÓGICA EM MANUFATURA ADITIVA DE BIOCERÂMICAS

André Candido Porto

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Ciência e
Engenharia de Materiais como requisito
parcial à obtenção do título de MESTRE EM
CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

Orientador: Dr. Daniel Rodrigo Leiva

Coorientador: Dr. Douglas Henrique Milanez

São Carlos-SP
2019

Dedico este trabalho para Neusa Maria Stella Massei Porto e Maria Teodora.

VITAE

Bacharel em Engenharia Biomédica pela Universidade Federal de Uberlândia
(2017).



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato André Candido Porto, realizada em 31/05/2019:



Prof. Dr. Daniel Rodrigo Lelva
UFSCar



Prof. Dr. José Angelo Rodrigues Gregolin
UFSCar



Prof. Dr. Antônio Carlos da Silva
IPEN

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES)- Código de Financiamento 001.

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que me auxiliaram por toda essa caminhada. Aos meus pais, **Murillo** e **Eunice** que fizeram o possível e mais um pouco para eu chegar até aqui. Não tem como mensurar seus esforços para ter um filho com titularidade de mestrado. Esta pesquisa só foi possível por vocês serem meus pilares.

Agradecimento especial para o Prof. **Daniel**, que teve a paciência de me orientar. Apesar das dificuldades, sempre acreditou que poderíamos fazer um ótimo trabalho.

Ao **Douglas**, que esteve junto por todo o tempo de pesquisa ao meu lado me coorientando. Sua ajuda e críticas foram imprescindíveis para conseguirmos chegar neste momento.

Para as mulheres exemplos da minha vida: **Neusa** e **Maria**, que são sempre uma referência na vida; **Beatriz**, por estar ao sempre ao meu lado, e **Isadora**, pelo companheirismo.

Aos companheiros do **DEMa** e **NIT/Materiais**, que estiveram juntos em todos os momentos deste trabalho, criticando e auxiliando para conseguir fazer uma pesquisa de qualidade.

Um último agradecimento às pessoas da **Bateria UFSCar**, por todos os momentos vividos neste tempo na Federal.

RESUMO

A Engenharia de Tecidos Ósseos se utiliza dos biomateriais na forma próteses estruturais implantáveis (*scaffolds*) para produzir suporte e crescimento de células teciduais. As biocerâmicas são os principais materiais utilizados pela compatibilidade com os tecidos ósseos, e o principal desafio na produção de *scaffolds* está em sua conformação devido às geometrias anatômicas complexas do corpo humano. Nessa perspectiva, a tecnologia de manufatura aditiva (MA) é vista como uma possível solução pela liberdade conformacional na produção das peças, embora haja desafios científicos a serem transpostos antes da aplicação desta tecnologia utilizando biocerâmicas no mercado. Desse modo, este estudo se propôs a mapear os avanços científicos e tecnológicos das biocerâmicas processadas por MA por meio de indicadores científicos no âmbito da prospecção tecnológica. A metodologia se baseou na aplicação da bibliometria como técnica para quantificar a informação encontrada em um conjunto de publicações científicas indexadas na base de dados Web of Science, e, como complemento, uma avaliação de especialistas na área de MA. Estas publicações científicas recuperadas foram filtradas e classificadas para criação de indicadores científicos tradicionais e, por meio de mineração de texto, os processos de MA e as biocerâmicas foram mapeados para análise de indicadores tecnológicos avançados. A análise desses indicadores mostrou uma tendência mundial de crescimento nas publicações em MA, com EUA, China e Alemanha sendo os países líderes nesse assunto. As principais MA específicas foram a fusão de leito em pó e polimerização de cubas. Entretanto, a maior ocorrência de pesquisas foi em termos gerais, tais como impressão 3D e prototipagem rápida. As biocerâmicas com maior ocorrência na mineração de texto das publicações científicas foram os Fosfatos de Cálcio, Alumina, Zircônia, com destaque para os vidros e vitrocerâmicas. O Brasil, apesar de estar entre os vinte principais países pesquisadores nesse tópico, está aquém na escala do panorama mundial.

Palavras-chave: Prospecção Tecnológica; Mineração de Texto; Manufaturas Aditivas; Biomateriais; Biocerâmicas

ABSTRACT

INDICATORS OF SCIENTIFIC PRODUCTION FOR TECHNOLOGICAL FORECASTING IN ADDITIVE MANUFACTURING OF BIOCERAMICS

In the Bone Tissue Engineering, biomaterials are used as scaffolds to produce a support and cell growing. Because of the similarity to the bones cells, ceramic compounds are the main materials used to produce the scaffold. However, the primary challenge of producing them relies on conformation, due to anatomical complex geometry. Under this perspective, the additive manufacturing technology (AM) is seen as a solution, because of its conformational liberty of parts production. Thus, a technological forecasting establish a scene of the AM researches in development and understate the uncertain towards the future of bioceramics application. This research aims to map the scientific and technological progress of bioceramics use in AM trough scientific indicators made in the technological forecasting context. The methodology is based on the use of bibliometry in a recordset of scientific publications indexed in the Web of Science database, and as complement, AM experts evaluations were used to arbitrate the scientific method. The recovered records were filtrated and classified by traditional scientific indicators and by text mining, the extraction of AM and bioceramics were made to produce advanced scientific indicators. The indicators analysis revealed a global tendency of growth in scientific papers of AM, with USA, China and Germany as the main countries with research in this topic. Brazil is the 20th country in this scenario, with the South and Southeast public education institutes as main agents. Regarding AM technologies the Powder Bed Fusion and Vat Polymerization, nonetheless the general processes were the one with the highest number of publications. The recurrent bioceramics were Calcium Phosphates, Alumina, Zirconia and a highlight to the glass and glass ceramics.

Keywords: Technological Forecasting; Text Mining; Additive Manufacturing; Biomaterials; Bioceramics.

PUBLICAÇÕES

EM PERIÓDICOS INTERNACIONAIS

PORTO, André Candido; MILANEZ, Douglas Henrique; LEIVA, Daniel Rodrigo. Technological forecasting on additive manufacturing for bone tissue engineering in Brazil. **International Journal Of Advances In Medical Biotechnology**. Araraquara, p. 69. mar. 2018.

PORTO, André Candido; MILANEZ, Douglas Henrique; LEIVA, Daniel Rodrigo. Scientific productivity indicators for technological forecasting of additive manufacturing of bioceramics. **Journal Of Biomaterials Applications**. Lancaster. nov. 2019.

EM ANAIS DE EVENTOS CIENTÍFICOS NACIONAIS

PORTO, André Candido; MILANEZ, Douglas Henrique; LEIVA, Daniel Rodrigo. Análise do cenário mundial e brasileiro de diferentes biocerâmicas produzidas por manufatura aditiva para engenharia de tecidos ósseos a partir de indicadores científicos. In: 23º CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E ENGENHARIA DOS MATERIAIS (CECEMM), 2018, Foz do Iguaçu. 2018.

ÍNDICE DE ASSUNTOS

	Pág.
FOLHA DE APROVAÇÃO.....	i
AGRADECIMENTOS.....	iii
RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vii
PUBLICAÇÕES.....	ix
SUMÁRIO.....	xi
ÍNDICE DE TABELAS.....	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xv
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	xix
1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	1
1.1 Manufatura aditiva e biocerâmicas: monitoramento tecnológico de uma nova possibilidade.....	1
1.2 Objetivos e justificativa.....	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Engenharia de tecidos ósseos e biomateriais.....	5
2.2 Biocerâmicas: aspectos históricos e tecnológicos.....	11
2.3 Manufaturas aditivas e materiais cerâmicos utilizados.....	18
2.4 Prospecção tecnológica baseada em indicadores científicos.....	25
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
3.1 Etapa inicial do procedimento experimental.....	32
3.1.1 Base de dados científicos e escopo de publicações científicas da dissertação.....	32
3.1.2 Recuperação de informação e expressão de busca.....	33
3.2 Etapa intermediária do procedimento experimental.....	35
3.2.1 Equipamentos e Softwares utilizados para o processamento de registros bibliométricos.....	35
3.2.2 Importação e pré-processamento de registros bibliométricos.....	36
3.2.3 Filtragem e Categorização.....	37
3.2.4 Mineração de texto para mapeamento dos processos de MA e das biocerâmicas.....	38

3.3	Etapa final do procedimento experimental	39
3.3.1	Indicadores bibliométricos de publicações científicas elaborados via mineração de dados.....	39
3.3.2	Indicadores bibliométricos avançados de publicações científicas elaborados via mineração de texto.....	40
3.3.3	Consulta a especialistas.....	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1	Panorama geral da produção científica em biocerâmicas aplicadas por manufatura aditiva.....	43
4.2	Evolução das pesquisas científicas em manufatura aditiva de biocerâmicas	
	50	
4.2.1	Análise pela perspectiva das manufaturas aditivas	50
4.2.2	Análise pela perspectiva das biocerâmicas	54
4.3	Panorama brasileiro das pesquisas científicas em manufatura aditiva de biocerâmicas	59
5	CONCLUSÕES.....	69
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	71
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
	APÊNDICE A – Definições De biomateriais	85
	APÊNDICE B – Terminologia de manufaturas aditivas por diferentes fontes de informações	87
B.1	Procedimento geral de formulação da expressão de busca	87
B.2	Terminologia definida em normas nacionais e internacionais.	88
B.3	Terminologia definida por mineração de texto.....	90
B.4	Terminologia definida por <i>papers</i> e livros de especialistas.....	93
B.5	Análise e termos finais da expressão de busca	96
	APÊNDICE C – REDES DE COLABORAÇÃO	99
C.1	– Redes de colaboração referentes aos dados mundiais.....	99
C.2	– Redes de colaboração referentes aos dados brasileiros.....	107

ÍNDICE DE TABELAS

	Pág.
Tabela 2.1 - Biomateriais utilizados como biomaterial na Engenharia de Tecidos ósseos, seus compostos, características e aplicações.	12
Tabela 2.2 - Biocerâmicas descritas em literatura que são utilizados na produção de peças por manufatura aditiva.	17
Tabela 2.3 - Biocerâmicas comerciais que são utilizadas na manufatura aditiva, seu processo de impressão e qual o método de ligante utilizado.	18
Tabela 3.1 - Termos selecionados e expressão de busca da dissertação.	34
Tabela B.1 - Terminologia Geral definida em norma com a análise de especialistas e parecer técnico da utilização na expressão de busca.	89
Tabela B.2 - Terminologia Específica definida em norma com a análise de especialistas e parecer técnico da utilização na expressão de busca.	89
Tabela B.3 - Termos gerais dos processos de manufaturas aditivas definidos em norma, extraídos por mineração de texto.	90
Tabela B.4 - Termos Específicos dos processos de manufatura aditiva definidos em norma, extraídos por mineração de dados.	91
Tabela B.5 - Termos Específicos do processo de Deposição Direcionada de Energia, extraídos de bibliografia.	93
Tabela B.6 - Termos Específicos do processo de Fusão de Leito em Pó, extraídos de bibliografia. Fonte: Autor	93
Tabela B.7 - Termos Específicos do processo de Jateamento de Material, extraídos de bibliografia. Fonte: Autor	95
Tabela B.8 - Termos Específicos do processo de Laminação de Folhas, extraídos de bibliografia. Fonte: Autor	95
Tabela B.9 - Termos Específicos do processo de Polimerização em Cubas, extraídos de bibliografia. Fonte: Autor	95
Tabela B.10 - Termos finais utilizados na expressão de busca da dissertação.	97

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1 - Exemplos de tecnologias para engenharia de reabilitação utilizados no corpo humano, sendo: prótese de acetábulo (quadril) (a), órtese (fixadores externos) de fêmur (b), scaffold cerâmicos de origem vegetal (c) e scaffold produzido por MA (d).	6
Figura 2.2 - Diagrama de Venn da Engenharia de Tecidos.....	7
Figura 2.3 - Diagrama de fases ternário do Bioglass com P ₂ O ₅ constante.	17
Figura 2.4 - Esquema de equipamento de MA por fotopolimerização em cuba.	20
Figura 3.1 - Fluxograma do procedimento metodológico de recuperação de publicações científicas para prospecção tecnológica utilizada na presente pesquisa.	31
Figura 3.2 - Captura de tela do Software VantagePoint v.5.0, com o filtro de base de dados (a) e os respectivos campos de análise (b).	37
Figura 3.3 - Etapas do processamento de Mineração de Texto para mapeamento de materiais e processos de MA.	38
Figura 4.1 - Número de publicações científicas mundiais no período de 1994 a 2018 na Web of Science.	43
Figura 4.2 - Os 20 principais países que possuem publicações científicas em biocerâmicas aplicadas por manufatura aditiva.....	44
Figura 4.3 - Publicações científicas dos 5 principais países pesquisadores de biocerâmicas aplicadas em MA no período de 1994 - 2018.	45
Figura 4.4 - Rede de colaboração dos 20 principais países que pesquisam biocerâmicas aplicadas por MA, sendo os EUA com maior força de ligação na rede (39,40%).	46
Figura 4.5 - Evolução das pesquisas norte-americanas nos três principais processos de MA no período de 1994 a 2018 pro quinquênio.	47
Figura 4.6 - Principais Instituições de Ciência e Tecnologia mundiais que possuem publicações científicas em cerâmicas/biocerâmicas e manufatura aditiva.	48

Figura 4.7 – Parte central da rede de colaboração entre as 50 principais instituições mundiais pesquisadoras no tema de biocerâmicas aplicadas por manufatura aditiva, com a Univ. de Osaka tendo 14,12% do total de força de ligação da rede.....	49
Figura 4.8 - Publicações científicas mundiais distribuídas por processo de manufatura aditiva definidos em norma, destaque em verde para os que possuem termos gerais e os em azul, como processo específico.	51
Figura 4.9 - Evolução temporal das publicações científicas de pesquisas dos processos de manufatura aditivas específicos e biocerâmicas em quinquênios no período entre 1994-2018.	52
Figura 4.10 - Rede central das cerâmicas aplicas no processo de SLS, com a Hidroxiapatita tendo 30,23% da força de ligação da rede.....	54
Figura 4.111 - Número de publicações científicas mundiais por quinquênio no período 1994- 2018 para as 10 principais biocerâmicas extraídas por mineração de texto.	56
Figura 4.12 - Parte central da rede de colaboração mundial entre os processos de MA com as biocerâmicas extraídas por mineração de texto, sendo a fusão de leito em pó com 29,50% da força de ligação na rede.	58
Figura 4.13 – Parte central da rede de colaboração de pesquisa científica entre as instituições de pesquisa brasileiras e os processos de MA, com a UFSC tendo 38,89% de força de ligação na rede.	64
Figura 4.14 - Parte central da rede de colaboração brasileira entre os processos de MA e as biocerâmicas mapeadas por mineração de texto, com a Hidroxiapatita tendo 28,57% da força de ligação na rede.....	68
Figura B.1 - Fluxograma da construção da expressão de busca final da dissertação.....	87
Figura C. 1 - Rede de colaboração dos 20 principais países pesquisadores de biocerâmicas e MA.	99
Figura C. 2 - Rede de colaboração entre as 50 principais Instituições mundiais pesquisadoras em biocerâmicas e MA.	100
Figura C. 3 - Rede de Colaboração entre as 20 principais Instituições de pesquisa em biocerâmicas pelos processos de MA definidos em norma.	101

- Figura C. 4 - Rede de colaboração de pesquisas científicas da Universidade de Rutgers (EUA) referente aos processos de MA e biocerâmicas. 102
- Figura C. 5 - Rede de colaboração de pesquisas da Universidade de Osaka referente aos processos de MA descritos em norma. 103
- Figura C. 6 - Rede de colaboração de pesquisas científicas em Alumina pelos processos de MA definidos em norma e os principais países que os pesquisam. 104
- Figura C. 7 - Rede de colaboração entre os principais países pesquisadores do processo de SLS e as biocerâmicas que estes estudam. 105
- Figura C. 8 - Rede de colaboração do processo de SLS e as principais biocerâmicas utilizadas nesta técnica. 106
- Figura C. 9 - Rede de colaboração entre o Brasil e os países que fazem pesquisas científicas em conjunto. 107
- Figura C. 10 – Parte da rede de colaboração entre o Brasil e os países que fazem pesquisas conjuntas no tópico desta dissertação, com ênfase nas biocerâmicas estudadas entre os países. 108
- Figura C. 11 - Panorama geral das instituições brasileiras pesquisadoras em biocerâmicas e MA, sendo que, por não possuírem pesquisas em conjunto, algumas ICTs não se conectam. 109
- Figura C. 12 - Rede de colaboração entre as instituições brasileiras de pesquisa e as principais biocerâmicas estudadas por ela, extraídas por mineração de texto. 110
- Figura C. 13 - Rede de coocorrência entre as Instituições de pesquisas brasileiras, os processos de MA definidos por norma e as biocerâmicas pesquisadas no contexto brasileiro. 111
- Figura C. 14 - Rede de coocorrência entre as biocerâmicas e os processos de MA no contexto do Brasil, extraídos por mineração de texto. 112
- Figura C. 15 - Rede de coocorrência de pesquisas científicas no Brasil entre biocerâmicas e os processos de MA específicos definidos por norma. 113
- Figura C. 16 - Rede de coocorrência entre pesquisas científicas da UFSC referente a biocerâmicas e os processos de MA definidos por norma. 114

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

3DP	3D Printing
ASTM	American Standard for Testing of Materials
BCP	Fosfato de Cálcio Bifásico
C&T	Ciência e Tecnologia
CAD	Computer Aided Design
CAFe	Comunidade Acadêmica Federada
CaP	Fosfatos de Cálcio
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
DED	Directed Energy Deposition
ECM	Matriz Extracelular
ESCI	Emerging Sources Citation Index
ET	Engenharia de Tecidos
ETO	Engenharia de Tecidos Ósseos
EUA	Estados Unidos da América
FDC	Fused Deposition of Ceramics
FDM	Fused Deposition Modeling
HA	Hidroxiapatita
HCA	Hidroxiapatita Carbonatada
ICT	Instituição de Ciência e Tecnologia
ISO	International Organization of Standardization
LENS	Laser Engineered Net Shaping
LOM	Laminated Object Manufacturing
MA	Manufatura Aditiva
nHA	nano-Hidroxiapatita
NIT	Núcleo de Informação Tecnológica
PBF	Powder Bed Fusion
PPGCEM	Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais
PUC/PR	Pontifícia Universidade Católica do Paraná
SCI-Exp	Science Citation Index Expanded

SLA	Estereolitografia
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
TCP	Fosfato Tricálcico
TRL	Technological Readiness Level
TTCP	Fosfato de Tetracálcio
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
WoS	Web of Science
α	alfa
β	beta
μ	micron

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

1.1 Manufatura aditiva e biocerâmicas: monitoramento tecnológico de uma nova possibilidade

No estudo de soluções tecnológicas para a reabilitação de pacientes na medicina e odontologia, utilizam-se próteses e órteses como ferramenta para fornecer substituição ou auxílio a membros e/ou funções ausentes ou deficientes do organismo. Sendo assim, de forma geral, os implantes são soluções protéticas arquitetadas para serem alocadas dentro do corpo animal. Um tipo específico de implante, denominado como *scaffold*, é uma estrutura de suporte tridimensional porosa desenvolvida para se obter temporariamente suporte mecânico para suportar esforços e uma taxa de degradação suficiente para haver crescimento tecidual do organismo.

A Engenharia de Tecidos (ET) é uma área multidisciplinar da biologia celular que analisa a interação destes *scaffolds* nas células por meio dos sinais que estas produzem em diferentes tecidos. Na ET, os *scaffolds* podem ser produzidos através de diversos biomateriais, que possuem essa denominação por serem materiais inseridos no meio biológico. Os biomateriais possuem características próprias para utilização em sistemas biológicos e são aplicados em diferentes utilidades na área da saúde. Historicamente, três gerações de biomateriais - independentemente de classes de materiais - foram desenvolvidas: bioinertes, bioativos e híbridos, sendo que os últimos procuram combinar aspectos das outras duas gerações.

Dentre os biomateriais para o uso na Engenharia de Tecidos Ósseos (ETO), as composições biocerâmicas destacam-se por sua similaridade com a matriz mineral do osso e, por este motivo, são fonte de estudo para desenvolvimento de diversas soluções biológicas com possibilidade de se tornarem produtos comerciais. Entretanto, um dos principais desafios de se produzir as biocerâmicas é a sua conformação em porções/partes anatômicas. Dependendo da rota tecnológica de processamento proposta, a produção da peça à verde, utilizando técnicas tradicionais de conformação apresentará

defeitos e estresse intrínsecos ao formato, e como consequência do pós-processamento, podendo vir a causar a quebra da peça. Com o advento da manufatura aditiva (MA), também chamada comercialmente de Impressão 3D ou Prototipagem Rápida, foi aberta uma perspectiva para a produção de produtos biocerâmicos com formas complexas, tais como as peças anatômicas.

Devido ao seu recente desenvolvimento, o processamento de biocerâmicas por meio de manufatura aditiva ser um assunto ainda emergente, dependente do avanço científico e relativamente não difundida comercialmente, torna-se interessante o acompanhamento dos avanços obtidos por meio da prospecção tecnológica. O objetivo da prospecção tecnológica é reconhecer o ambiente tecnológico no qual novos produtos, processos e aplicações tem sido desenvolvido e auxiliar no processo de tomada de decisão em pesquisa, desenvolvimento e inovação. Há uma diversidade de técnicas de prospecção tecnológica disponíveis, entretanto, dado o atual volume de informação disponível, técnicas quantitativas são utilizadas para o estabelecimento do cenário científico por trás do avanço tecnológico pretendido.

Neste contexto, a presente pesquisa motiva-se pela geração de informação estruturada de interesse estratégico para auxiliar empresas de base tecnológica em materiais na tomada de decisão na seleção de processos ou materiais. A pesquisa se propõe em desenvolver indicadores de Ciência e Tecnologia (C&T), com base na aplicação da bibliometria, para fazer o monitoramento tecnológico das biocerâmicas produzidas por manufatura aditiva, tendo como hipótese a validade do método analítico para compreensão do cenário científico. Pretende-se avaliar a evolução das técnicas de manufatura aditiva e dos biomateriais cerâmicos utilizados nesta aplicação, mapear as principais instituições e países que pesquisam este assunto, oportunidades e potenciais nichos de mercado, e contribuição do Brasil nesse panorama acadêmico e comercial.

1.2 Objetivos e justificativa

Considerando as oportunidades científicas que podem desencadear o desenvolvimento de soluções tecnológicas, o objetivo da presente pesquisa é prospectar o avanço científico da conformação pelo processo de manufatura aditiva de biomateriais cerâmicos que são utilizadas na área de engenharia de tecidos ósseos por meio de indicadores de publicações científicas. Especificamente, os seguintes objetivos foram traçados:

- Aplicar os principais conceitos sobre elaboração e análise de indicadores científicos, com base na prospecção tecnológica, e aplicá-los no contexto de biocerâmicas conformadas por manufatura aditiva;
- Compreender a conjuntura científica e tecnológica atual dos processos de manufatura aditiva disponíveis para o contexto de materiais cerâmicos, biomateriais cerâmicos e engenharia de tecidos ósseos;
- Mapear o cenário científico global sobre as pesquisas envolvendo biocerâmicas aplicadas por manufatura aditiva, e analisar o papel das pesquisas brasileiras em vista de contribuir para seu avanço;
- Analisar a partir de publicações científicas parâmetros bibliométricos das biocerâmicas produzidas por manufatura aditiva, bem como sua evolução temporal, distribuição geográfica, principais agentes (empresas e instituições) e seus domínios tecnológicos; e
- Avaliar as limitações do procedimento metodológico adotado e as eventuais adaptações necessárias para a prospecção tecnológica do referido tema.

2 REVISÃO BIBLIGRÁFICA

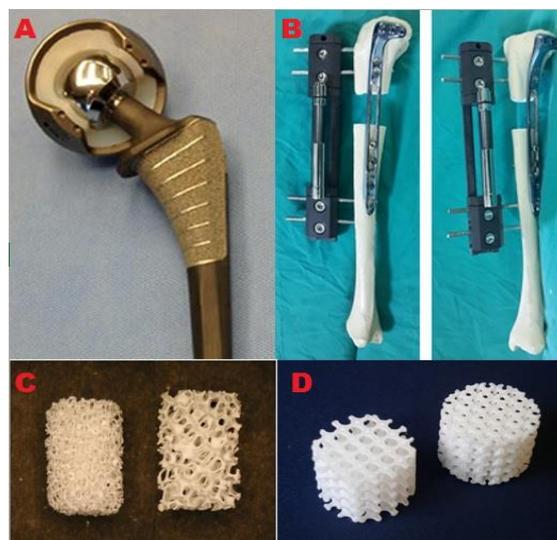
2.1 Engenharia de tecidos ósseos e biomateriais

A Engenharia de Tecidos (ET) nasceu da necessidade da medicina cirúrgica utilizar enxertos em procedimentos reconstrutivos de órgãos e tecidos humanos [1]. O avanço científico e tecnológico da ET se fez com o desenvolvimento do método científico em cirurgias, consolidação do conceito de esterilização e anestesia, além da aceitação dessas práticas na medicina. Em decorrência desse fato e pela II Guerra Mundial na década de 1950, devido à escassez de materiais naturais encontrado no corpo do próprio paciente ou de outros seres vivos, foi aberta a possibilidade de se utilizar materiais sintéticos para substituir por completo ou parcialmente membros corporais [1,2]. Assim, as pesquisas básicas a respeito destes materiais implantáveis começaram a ser realizadas com maior frequência devido à possibilidade da reprodutibilidade de ensaios e de estudos clínicos, resultando na inserção dos materiais sintéticos no cotidiano cirúrgico [1,3]. Surgiram, então, novas abordagens tecnológicas que possibilitaram a substituição de órgãos/membros ou crescimento de células em matrizes específicas para cada aplicação [4].

Pelo dicionário de Engenharia Biomédica [5], há diversas propostas tecnológicas para materiais implantáveis. Entretanto, há duas grandes vertentes para esses materiais, as próteses e as órteses. A prótese é um dispositivo externo ao corpo que é colocado no organismo com o intuito de substituir ou auxiliar na função de membros ausentes ou defeituosos. Assim, as próteses podem ser utilizadas no cotidiano para executar a atividade a qual ela está se propondo a substituir e, também, para restaurar aspectos estéticos do corpo humano [6]. Por outro lado, as órteses são dispositivos assistivos que são desenvolvidos para auxiliar a funcionalidade de porções anatômicas. Sendo assim, as órteses são utilizadas, por exemplo, para sustentar ou auxiliar na postura corporal ou de um membro e assistir ou resistir à movimentação das articulações durante a marcha [7].

O campo de ET depende extensivamente do uso de implantes específicos porosos e tridimensionais chamados de *scaffolds*, termo técnico para esses tipos de implantes e/ou estruturas de suporte. Eles provêm o suporte e o ambiente propenso para as células se proliferarem e manterem sua função diferencial. Sua arquitetura age como modelo para formação de tecido e são tipicamente semeados com células e fatores de crescimento, definindo a forma final do novo tecido (osso ou cartilagem, por exemplo) [8,9]. Portanto, um scaffold tem como conceito transportar biofatores, tais como células e proteínas, para dentro de um biomaterial tridimensional com estrutura arquitetada para conseguir prover temporariamente propriedades mecânicas para o implante e, ao mesmo tempo, preservar o volume de tecido pela sua taxa de decomposição de material pela regeneração tecidual do paciente [10].

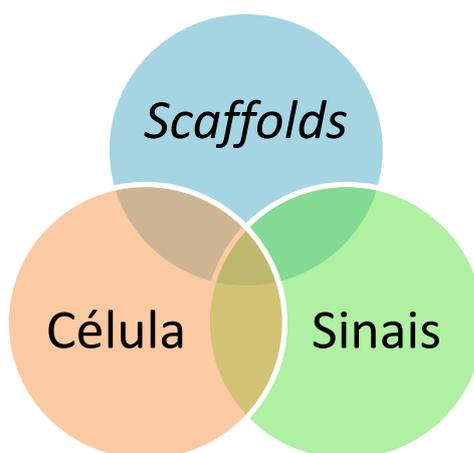
Com isso, dentre outras características específicas, um scaffold deve ter: (i) arquitetura tridimensional porosa e interconectada para atividades metabólicas; (ii) ter propriedades biológicas desejáveis, com desempenho específico da taxa de degradação do material pelo crescimento de tecido; e (iii) propriedades tribológicas e mecânicas adequadas para o sítio de implementação [8].



Fonte: Elaborado pelo autor com imagens gratuitas online da “creative commons”

Figura 2.1 - Exemplos de tecnologias para engenharia de reabilitação utilizados no corpo humano, sendo: prótese de acetábulo (quadril) (a), órtese (fixadores externos) de fêmur (b), scaffold cerâmicos de origem vegetal (c) e scaffold produzido por MA (d).

A nível celular, a ET propõe-se a tratar patologias do organismo pela nutrição da matriz extracelular (ECM) para, com isso, minimizar os fatores adversos de compatibilidade (biocompatibilidade) e otimizar os fatores do ambiente biológico. Logo, as soluções tecnológicas da ET funcionam como uma ferramenta para que o corpo tenha, por meio de fatores biológicos, a possibilidade para se regenerar localmente pelos seus processos bioquímicos [1,2,11]. Como consequência, a definição de ET pode ser explicada por uma tríade baseada na biologia de tecidos, conforme definida por Bell [2] e apresentada por meio de um Diagrama de Venn da Figura 2.1.



Fonte: Adaptado de [2].

Figura 2.2 - Diagrama de Venn da Engenharia de Tecidos.

A tríade é composta pelos *scaffolds*, pelas células que estão presentes em um determinado tecido e pelos sinais celulares que determinam as reações biológicas para especificação, crescimento e nutrição de um tecido humano. Toda interação entre os elementos da tríade são realizadas na ECM, onde: após a implantação, um sinal biológico é gerado para que os fatores de crescimento celular iniciem um processo de desenvolvimento de células específicas na superfície do *scaffold*, fazendo a interação do organismo com o biomaterial [2].

Pelo fato de o corpo humano possuir uma variedade de tecidos devido às suas funções específicas, foram feitas divisões na ET com o intuito de melhor aplicar e desenvolver as tecnologias existentes. Esta pesquisa se limitou à ciência da Engenharia de Tecidos Ósseos (ETO), que envolve os tecidos estruturais, como ossos, cartilagem, ligamentos e tendões [7,8]. Assim, os

scaffolds são os principais agentes de fornecimento de estabilidade mecânica para a síntese de novas ECM pelas células. Consequentemente, para evitar a rejeição do material implantado, é aconselhável que o *scaffold* e o tecido original tenham, entre outras questões, estrutura química e propriedades mecânicas compatíveis às do hospedeiro [12].

Por este motivo, a ETO utiliza-se de *scaffolds* cerâmicos, sendo a Hidroxiapatita (HA) a mais conhecida, pela semelhança química com os compostos do osso humano. Outra vantagem das cerâmicas é pela característica porosa desses materiais, que auxiliam as células osteoprogenitoras¹ no desenvolvimento e absorção da interface do implante no corpo [2]. Estes materiais utilizados na área biomédica são denominados de biomateriais e seu projeto, desenvolvimento e aplicação dependem também do conhecimento encontrado na área da Ciência e Engenharia de Materiais. Com a evolução dessa ciência, várias definições foram desenvolvidas ao longo do tempo por autores e instituições de referência [3,5,13–18] – conforme mostrado detalhadamente no Apêndice A.

Em sua maioria, as definições descrevem os biomateriais como materiais sintéticos ou naturais que interagem com o meio biológico para substituir ou reparar funções danificadas. Entretanto, algumas definições tendem a ser mais específicas, para conseguir englobar outras aplicações, o que faz com que algumas definições levem em consideração a forma física do material [14], seu meio de fabricação [3] e a área biomédica que será aplicada [18]. Nessa pesquisa, pelo entendimento da aplicação direta dos materiais na ETO, o conceito adotado é do Turrer [15], que define os biomateriais como

[...] materiais de origem biológica ou sintética utilizados para confecção de implantes, aparelhos ou sistemas que estarão em contato com sistemas biológicos e tecidos vivos com objetivos de reparar perdas teciduais e/ou restaurar funções comprometidas por processos degenerativos ou traumatismos. [15]

¹ Células osteoprogenitoras são células encontradas nos ossos, medula óssea e outros tecidos conjuntivos que tem a função de formar populações de células tronco para poder se diferenciar nas células formadoras de osso [99].

Historicamente, o uso dos biomateriais considerou a interação com os tecidos biológicos através das respostas imunológicas do organismo. Como consequência, diferentes abordagens foram investigadas para desenvolvimento dos biomateriais, sendo classificando-os tanto por sua atividade no meio biológico (bioinerte e bioativo) como por sua classe (metálico, cerâmico, polimérico e composto) [3,4,19].

No que se refere à resposta biológica, a história traz três momentos diferentes que se tornaram gerações dos biomateriais. A primeira, desenvolvida pela área da medicina ortopédica e pela odontologia, se propunha a substituir tecidos biológicos sem que houvesse interação destrutiva do material com o corpo e vice-versa, que se denominou como materiais bioinertes [6, 26]. Apesar desse termo ser discutível por alguns autores [13,27], Wilson [22] os definiu como “material que apresenta uma resposta interfacial mínima e que não resulta na ligação ou na rejeição do tecido hospedeiro, formando uma cápsula fibrosa ao redor do material”, enquanto [19] procura um material estável, não degradável e que substitua partes ou inteiros de tecidos e órgãos, reabilitando funções biológicas pelas interações físicas do implante.

Os principais representantes destes materiais utilizados nessa geração são as ligas de Co-Cr, Ni-Ti e aço inox para os metais [19], a alumina e zircônia para as cerâmicas [4, 9] e as resinas acrílicas, polimetilmetacrilato (PMMA) e polietilenos (PE) para os materiais poliméricos [23].

A segunda geração dos biomateriais desenvolveu abordagens contrárias à primeira, ou seja, materiais que tivessem uma interação com o sistema onde está implantado, e como consequência, sendo materiais bioativos. Desse modo, podemos defini-los como materiais que interagem ou fazem efeito por suas características físico-químicas em um tecido, com o objetivo de guiar ou ativar uma resposta ou um comportamento específico na interface formada quimicamente, cedendo material ou não [6,12].

Estes biomateriais começaram a se desenvolver entre a década de 70 e 80 e nos anos 2000 [13,29] e os principais avanços nessa geração se deram pelo desenvolvimento da área de engenharia de tecidos e de materiais cerâmicos porosos, pois facilitavam a reintegração óssea e a recuperação do

paciente. Como exemplo cerâmico dessa geração, podemos citar os biovidros, fosfatos de cálcio (CaP) e a hidroxiapatita (HA), enquanto que para os polímeros temos o poliácido glicólico (PGA) e poliácido láctico (PLA) [4].

Com o avanço das tecnologias e processos de manufatura, um híbrido entre os dois períodos anteriores caracterizou a terceira geração dos biomateriais. O foco desta geração se deu em buscar novas abordagens com maior desempenho ou especificidade na solução de um caso clínico. Assim, se procurou biomateriais compostos por segmentos inertes e com uma bioatividade ou biodegradação em seções específicas. A atuação assim, pode se dar na engenharia de tecidos pela produção de *scaffolds* específicos com células adsorvidas na superfície, interagindo com o meio; e na regeneração tecidual localmente (*in situ*), para obter interação do material com o tecido do paciente, possibilitando liberação de íons, sinalização de moléculas e ativação genética para regenerar o tecido [6,30].

No escopo do estudo tipológico dos biomateriais, os materiais metálicos são utilizados principalmente em situações em que as propriedades mecânicas pós-operatórias são mais exigidas, tais como implantes dentários e estruturas ortodônticas, implantes de quadril, joelho, ombro, coluna, cotovelo e punho, materiais de fixação óssea como pregos, parafusos, porcas e placas, entre outras aplicações de suporte que não em ortopedia ou odontologia [24]. O início do uso destes metais se deu na década de 1930 com experimentos em gatos que enalteceu as ligas de titânio como biomaterial, assim como o aço inoxidável e as ligas de CoCrMo [25]. Em uma seleção desses materiais, os principais metais que se destacam são as ligas de titânio (comercialmente puro e a liga Ti64), que possuem alta resistência à fadiga, baixa densidade, alta resistência à corrosão, boa biocompatibilidade e alta osteocondução em tecidos biológicos.

As principais desvantagens desses materiais são decorrentes dos efeitos tóxicos que os metais produzem no ambiente corporal. Dentre eles, podemos citar a intoxicação por Ni, Co e Cr no organismo, doenças relacionadas à pele devido ao Ni e potencial cancerígeno devido à presença de Co. Em relação às propriedades mecânicas, algumas ligas possuem um módulo elástico muito mais alto que o osso, fazendo com que o osso sofra estresse localmente e perca

propriedades mecânicas. Além disso, há falhas por fadigas em implantes que são submetidos a ciclos de carga e descarga ao longo de muitos anos [26–28].

Os materiais poliméricos – naturais e sintéticos – estão presentes em diversas aplicações médicas e de suporte hospitalar, sobretudo por causa de sua fácil processabilidade e conformação [19,29]. Assim, possuem maior aplicação em insumos da saúde, tais como suturas e bandagens, materiais de cirurgia e próteses estéticas, do que em soluções tecnológicas complexas [3]. Neste último caso, pode-se citar as tecnologias que se utilizam das moléculas poliméricas como meio dispersante de drogas no organismo humano (*drug delivery*) [19]. Algumas desvantagens dos polímeros em aplicações de engenharia de tecidos são intrinsecamente atreladas à alta reatividade dos compostos orgânicos ao interagirem com o corpo humano, degradando em taxas menores do esperado e liberando subprodutos tóxicos no corpo humano. Em complemento, as aplicações dos biomateriais poliméricos são limitadas pela falta de vascularização na construção de tecido quando implantado, afetando a consolidação por integração de células no local [30].

Em termos monetários, estudos recentes de mercado dos biomateriais mostram que estes valem, mundialmente, em torno de US\$ 70 bilhões, com taxa de crescimento de aproximadamente 15%, o que projetando para o ano de 2021, chegaria ao valor de US\$ 130 bilhões [13,29,31]. Desse valor, segundo avaliações de empresas especializadas, o mercado brasileiro no ano de 2017 representou US\$ 1,7 bilhão, com crescimento de até 20% [4,5]. Esses valores corroboram com o crescimento e desenvolvimento de tecnologias de biomateriais para a ETO a nível brasileiro e mundial, mostrando que o investimento neste setor tem a possibilidade grande de retorno financeiro e tecnológico.

2.2 Biocerâmicas: aspectos históricos e tecnológicos

Devido às suas propriedades mecânicas e funcionais, compostos biocerâmicos têm sido fundamentais para o desenvolvimento dos biomateriais,

em vista de suas aplicações em próteses ortopédicas, dispositivos para a reconstrução odontológica e maxilo-facial e preenchimentos ósseos [21]. As principais cerâmicas utilizadas na área da saúde são a alumina (Al_2O_3), zircônia (ZrO_2), os fosfatos de cálcio (CaP) e os vidros e vitrocerâmicas. A Tabela 2.1 mostra um resumo das biocerâmicas mais usuais e seus compostos que são utilizadas clinicamente, as principais características e exemplos de aplicações.

Tabela 2.1 - Biomateriais utilizados como biomaterial na Engenharia de Tecidos ósseos, seus compostos, características e aplicações.

Biocerâmica	Principais compostos	Características	Aplicações	Fonte
Alumina	<ul style="list-style-type: none"> • Al_2O_3 • $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ • $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ • Safira (Alumina Monocristalina) 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada dureza; • Resistência à compressão; • Resistência à abrasão; • Quimicamente inertes; • Estável ao meio biológico; 	<ul style="list-style-type: none"> • Implantes odontológicos; • Acetábulo de quadril; • Cabeças femorais; • Próteses de joelho; • Elementos para reconstrução maxilo-facial; • Parafusos para ossos; • Substitutos de ossículos do ouvido médio; e • Substituições segmentares de ossos. 	[9], [15–17]
Zircônia	<ul style="list-style-type: none"> • Monoclínica (M); • Cúbica (C); e • Tetragonal (T) 	<p>Em comparação com a Alumina:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Maior força; • Menor dureza; • Menor módulo elástico. 	<ul style="list-style-type: none"> • Confeção de cabeças femorais em próteses de quadril; • Próteses de joelho; • Próteses de ombro; e • Material odontológico. 	[3,37,38]
Fosfatos de Cálcio	<ul style="list-style-type: none"> • Hidroxiapatita (HA); • Fosfato Tricálcico (TCP); • $\alpha\text{-TCP}$; • $\beta\text{-TCP}$; e • Cimentos de Fosfatos de Cálcio (CFC). 	<ul style="list-style-type: none"> • Excelente biocompatibilidade; • Comportamento bioativos; • Elevados níveis de osteointegração e osteocondução; • Potencial osteocondutivo; • Rápida absorção 	<ul style="list-style-type: none"> • Reconstruções crânio-maxilo-facial; • Tratamento de defeitos ósseos; • Não formação de tecido fibroso; • Reduzido tempo de cicatrização; • Íntima adesão implante/tecido. 	[3,39–43]

Biovidro	<ul style="list-style-type: none"> • Bioglass® 	<ul style="list-style-type: none"> • Formação superficial de HA carbonatada biologicamente ativa; • Forte ligação interfacial ao tecido ósseo; e • Força de adesão interfacial resistente a altos esforços mecânicos. 	Reparo e regeneração óssea na: <ul style="list-style-type: none"> • Ortopedia; • Periodontia; • Reconstrução maxilo-facial; • Cirurgia da coluna vertebral; e • Reconstruções otorrinolaringológicas. 	[3,39,44,45]
-----------------	---	--	--	--------------

Fonte: Elaborado pelo autor.

A alumina e suas formas derivadas foram as primeiras biocerâmicas utilizadas na prática clínica, estando consolidadas no mercado por mais de 20 anos. Por estes motivos, vários estudos e aplicações foram desenvolvidos, onde a norma técnica ISO 6474-1: 2010 define suas propriedades físicas para auxiliar na seleção desses materiais [46]. A alumina se destaca pelas boas propriedades tribológicas quando seus grãos são pequenos (menores que $500\mu\text{m}$) e com distribuição estreita de tamanho de partículas. As vantagens do uso da alumina se dão pela excelente resistência à corrosão, boa biocompatibilidade, alta resistência ao desgaste e baixo coeficiente de atrito [47]. Entretanto, uma desvantagem descrita em literatura da alumina se deu pela falta de afinidade dela a íons de cálcio e fosfato de hidrogênio, tornando a interação com o tecido ósseo hospedeiro muito frágil [48,49]. Suas principais aplicações clínicas são em próteses de joelho, maxilar, implantes dentários, parafusos e pinos, dentre outras aplicações específicas [50,51].

A zircônia (ZrO_2) é um biomaterial cerâmico utilizado como alternativa para a alumina por sua biocompatibilidade (nenhuma reação adversa localmente, nem de citotoxicidade) e propriedades mecânicas que permitem ser sensíveis ao estresse por elevadores de tensão, permitindo maior flexibilidade nos modelos anatômicos [38]. Apresenta-se nas formas monoclinica (M), cúbica (C) e tetragonal (T), sendo esta última a mais estudada [49,52]. Ou seja, a zircônia estabilizada por ítrio ou também chamada de zircônia policristalina tetragonal (TZP) possui propriedades mecânicas de interesse como biomaterial, por sua alta tenacidade à fratura e resistência à tração, tornando possível produzir próteses mais eficientes do que as de Al_2O_3 . Com isso, ela é utilizada

em próteses totais de articulações, tais como cabeças femorais para próteses de quadril [50].

Em complemento, a zircônia possui propriedades biológicas de não ser carcinogênica, ausência de efeito oncogênico e, devido ao tamanho de seus grãos, é um local de nucleação para o desenvolvimento de minerais à base de cálcio, tendo assim alta afinidade pelo tecido ósseo. Por conta de suas propriedades óticas e pela aparência, a zircônia também encontrou uso como material restaurador nas aplicações odontológicas. Sua principal desvantagem ocorre degradação causada pela presença de água, aumentando a rugosidade da interface, afetando a osteointegração do implante e, como consequência, seu sucesso clínico [49].

As comercialmente chamadas cerâmicas porosas para medicina e odontologia são, na verdade, biocerâmicas à base de fosfato de cálcio (CaP). Seu desenvolvimento se deu pelo fato da matriz mineral óssea de humanos ser constituída de até 70% de CaP e uma parte orgânica (na maior parte colágeno tipo I). Assim, no final da década de 1970 e durante a década de 1980, as pesquisas focaram em desenvolver soluções de diferentes CaP para enxertia óssea [50,53,54]. Alguns exemplos destes materiais inorgânicos à base de CaP que receberam mais atenção para aplicações de reparo ósseo são a hidroxiapatita (HA), o fosfato tricálcico (TCP/ β -TCP), fosfato de tetracálcio (TTCP) e fosfato de cálcio bifásico (BCP) [3]. Além dessas diferentes composições, os CaPs podem ter origem natural (vegetais ou animais, tais como corais e bovinos), e podem ser encontrados em diferentes formas físicas (particulados, blocos, revestidos, etc.) [49,54].

Pela similaridade com a matriz mineral do osso, a principal característica dos CaP é decorrente de ter alta afinidade pelas proteínas presentes na ECM, fazendo-os portadores ideais para fatores de crescimento ósseo e outros precursores celulares de tecido ósseo. Com isso, tornando-os, em termos biológicos, materiais bioativos e osteocondutores [54]. No que tange às suas propriedades mecânicas em implantes, possuem função de preencher ordenadamente um espaço/falha, desenvolvendo uma complexa estabilidade mecânica pelo crescimento do osso do paciente nos poros da cerâmica.

A razão de bioabsorção desse material quando há uma inserção de células do tecido no *scaffold*, é diretamente atrelada a razão de Cálcio/Fósforo (Ca/P). A Hidroxiapatita, de fórmula química $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, possui uma razão Ca/P igual a 1,67, tomado como valor de referência para biomateriais de enxertia óssea [55]. Valores menores indicam que o material tende a ser degradado com maior facilidade, enquanto que valores maiores não se degradam ou iniciam a degradação após um longo período de tempo [54]. As principais utilizações destes materiais incluem implantes dentários, na ortopedia, em cirurgias maxilo-faciais/craniofaciais, em cirurgia na coluna vertebral, no revestimento de próteses metálicas ortopédicas e odontológicas, *scaffolds* para crescimento ósseo e em cirurgias de quadril e joelho [50,51]

O fosfato tricálcico (TCP) é um outro material cerâmico de CaP bem sucedido para a substituição de tecidos duros reabsorvíveis quando é necessária apenas baixa resistência mecânica [51]. O TCP é preparado por sinterização de apatita deficiente em Ca precipitada por reações em estado sólido em alta temperatura. O TCP possui Ca/P de 1,5, fazendo que ele seja mais biodegradável do que a HA [54]. Quando comparado ao β -TCP, a HA reabsorve lentamente e sofre pouca conversão a um material semelhante ao osso após o implante. No entanto, para a mesma porosidade, os suportes de β -TCP geralmente têm menor resistência do que os suportes de HA, afetando sua aplicação dada a menor carga mecânica suportada [53]. Suas aplicações são geralmente em alguns reparos da mandíbula ou da cabeça.[56]

Outra cerâmica porosa é o fosfato de cálcio bifásico (BCP). LeGeros [54] descreve um processo de produção de BCP obtido por sinterização de apatita precipitada deficiente em Cálcio em proporções de Ca/P que variam de HA para β -TCP. Esta variação da razão Ca/P permite a manipulação da taxa de degradação do implante, bem como outras propriedades biológicas, como a entrega de fármacos no resíduo da reação [53].

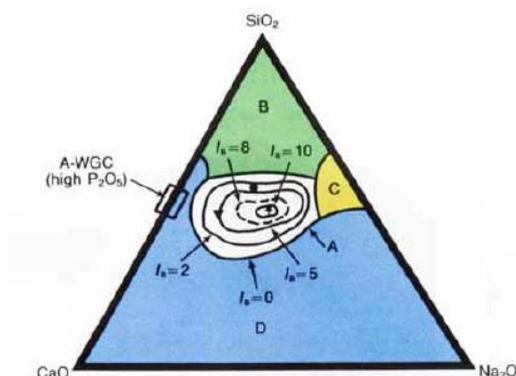
Os vidros (estrutura amorfa e bioinerte) e vitrocerâmicas (vidro cristalizado, com uma fase cristalina e uma fase vítrea residual) tornaram-se alvo de esforços de grande parte da comunidade acadêmica pela alta bioatividade dos biovidros [57]. A bioatividade dos biovidros é diretamente ligada à produção

de uma camada de hidroxiapatita carbonatada (HCA) biologicamente ativa, que é um composto semelhante quimicamente e estruturalmente à fase mineral do osso humano. Apesar de difusa entre pesquisadores, a literatura define que a bioatividade da camada de HCA é feita pela adsorção de proteínas às fibrilas de colágenos auxiliando na fixação de células formadoras de osso (osteoblastos), na diferenciação celular e excreção de ECM óssea [50,51,53]. Por consequência, na mineralização para formar um cristalito e colágeno na superfície do implante de vidro, enquanto a degradação e conversão do vidro continua ao longo do tempo [53,54,58]

O Bioglass™, também chamado de Bioglass 45S5, desenvolvido por Hench [51] caracteriza-se por ser constituído de 45% em peso de SiO₂ e por ter proporção de 5/1 de Cálcio para Fósforo. Embora considerado como referência no universo de biovidros, a produção de implantes com a composição 45S5 é complexa devido à dificuldade de se processar esse composto. Vidros bioativos porosos geralmente são feitos por fundição de partículas vítreas por sinterização, já conformadas na geometria desejada. Além disso, a 45S5 possui uma faixa estreita de temperatura de transformação vítrea e o início da sua cristalização, fazendo com que quando essas partículas são sinterizadas, elas podem cristalizar totalmente ou parcialmente. O resultado desse processo é uma redução na bioatividade e instabilidade do *scaffold* devido a preferência das regiões amorfas de se degradarem antes.

A Figura 2.2. mostra o diagrama de fases ternário do sistema Na₂O-CaO-SiO₂-P₂O₅ do Bioglass™ com 6% em peso de P₂O₅ constante. Nele, tem-se quatro regiões que definem as propriedades biológicas dos vidros bioativos e vitrocerâmicas. Na região A se observa bioatividade (ligação com o osso), sendo assim chamada de região de ligação bioativa. Na região B, se encontram os vidros de sílica, que se comportam como materiais bioinertes. Na região C estão os biomateriais vítreos reabsorvíveis, enquanto que na região D, pela dificuldade de processamento, não foram testadas como implantes [50,51,58] Os principais motivos para essa bioatividade ocorrem pela menor presença de sílica, alto teor de Na₂O e CaO, o que lhes confere uma superfície altamente reativa quando em contato com um meio aquoso, como os fluidos corporais. Outras composições

de vidros e vitrocerâmicas foram desenvolvidas com o intuito de sanar tais deficiências encontradas no Bioglass 45S5, entretanto, poucas obtiveram resultados satisfatórios.



Fonte: [50,51].

Figura 2.3 - Diagrama de fases ternário do Bioglass com P_2O_5 constante.

O problema de conformação de vidros e vitrocerâmicas mencionado acima, também se estende para os outros materiais cerâmicos que são utilizados como biomateriais. Uma possível solução para este problema está no processamento avançado de materiais, como por exemplo, a manufatura aditiva de compostos cerâmicos. Para começar a estudar essa possibilidade, Bose [12] fez um levantamento extenso da literatura para definir as principais biocerâmicas utilizadas na impressão 3D na engenharia de tecidos ósseos. A Tabela 2.2 apresenta eles em conjunto com dois parâmetros de processamento, a espessura de cada camada cerâmica impressa e qual o ligante utilizado para auxiliar o processamento.

Tabela 2.2 - Biocerâmicas descritas em literatura que são utilizados na produção de peças por manufatura aditiva.

Material	Espessura da Camada	Ligante (Binder)
TCP	20 μm	À base de água
HA	100 μm	Sem informação
TCP, DCP e TTCP	100 μm	25% de Ácido Nítrico
HA	300 μm	Schelofix (Composto polimérico à base de água)
TTCP/ β -TCP	100 μm	25%p de Ácido Cítrico
TTCP/Sulfato de Cálcio Dihidratado	100 μm	25%p de Ácido Cítrico
SiO_2 -ZnO - Dopado com TCP	20 μm	À base de água
TTCP (produto final: HA)	100 μm	0.5mol/L $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ +10% H_3PO_4

Fonte: Adaptado de [6].

Em uma outra perspectiva de análise, Ferrais [47] se utilizou dos principais processos comerciais existentes de manufatura aditiva para levantar quais as eram as biocerâmicas que estavam sendo citadas. O resultado foi de sete grupos distintos, que estão descritos na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Biocerâmicas comerciais que são utilizadas na manufatura aditiva, seu processo de impressão e qual o método de ligante utilizado.

Processo MA	Mecanismo de Ligante Cerâmico	Materiais Cerâmicos
Polimerização em Cuba	Particulado no fotopolímero	Si ₃ N ₄ , Al ₂ O ₃ e ZrO ₂
Jateamento de Ligante	Particulado aderido	SiC e Al ₂ O ₃
Jateamento de Material	Particulado no Fotopolímero	Al ₂ O ₃
Deposição Direta de Energia	Fusão	Al ₂ O ₃
Extrusão de Material	Ligante em barbotina de particulado	SiC, Si ₃ N ₄ , Al ₂ O ₃ , ZrO ₂ e ZrC
Fusão de Leito de Pó	Fusão, Sinterização, ligante transiente e químico	SiC, Si ₃ N ₄ , SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , ZrO ₂ e ZrB ₂
Laminação de Folhas	Particulado no ligante com aglutinante	Al ₂ O ₃ , ZrO ₂ , Si ₃ N ₄ e SiC

Fonte: Adaptado de [42].

2.3 Manufaturas aditivas e materiais cerâmicos utilizados

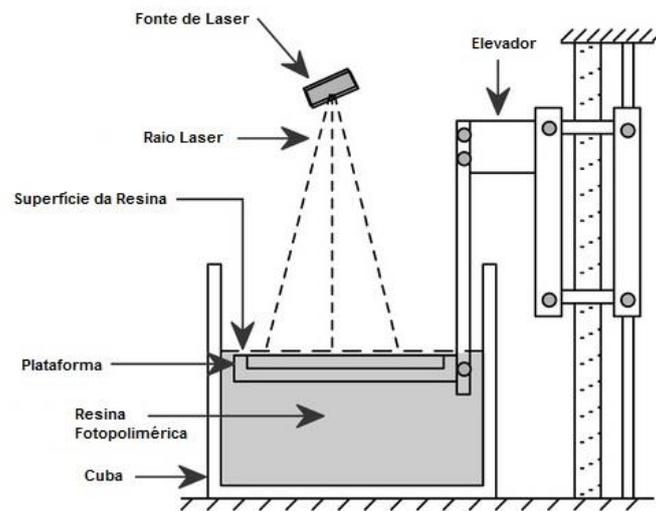
Historicamente, o marco dos processamentos por manufatura aditiva (MA) se encontra na década de 1970 pelo invento e patenteamento do equipamento de Estereolitografia pela 3D Systems [59,60]. Com o decorrer dos anos, o aperfeiçoamento dessa técnica e o desenvolvimento de outros processos, surgiram novos produtos e soluções comerciais. Em sua maioria, os equipamentos buscavam a produção de protótipos de produtos na indústria e maquetes na arquitetura. Por este motivo, os processos de MA foram sendo denominados popularmente de Prototipagem Rápida e/ou Impressão 3D. Por este motivo há uma confusão no jargão técnico por tratarem o processo pelo termo comercial e não descrevendo a tecnologia em si, o que afeta a recuperação de informações pertinentes aos processos de MA [59]. A norma técnica ASTM 52900:2015 faz um agregado das técnicas existentes e as

classifica em grupos de processamento para tentar solucionar esse problema de terminologia [61].

O processo geral de qualquer técnica de MA se inicia com a produção de um modelo 3D da peça a ser produzida em desenho técnico feito por um software de computador (técnica de Computer Aided Design ou CAD, em inglês) [2,12,62]. Com o modelo em CAD pronto, outro software do equipamento irá “fatiar” a peça 3D em várias camadas 2D que quando sobrepostas, irão formar o desenho final [59]. Cada equipamento e técnica de MA possui uma resolução máxima de espessura para essas camadas, o que desencadeia a definição superficial do produto final. Após produzida, algumas técnicas de impressão já terão a peça pronta para uso, enquanto outras precisarão de um pós-processamento para acabamento superficial ou finalização da peça, como por exemplo a sinterização de peças cerâmicas [59].

Polimerização em Cubas

A comercialmente chamada Estereolitografia (SLA), é um processo de polimerização em cubas desenvolvido e patenteado pela empresa americana Stratasys em 1986, tornando o marco inicial das MA no mundo [59,61,63]. Ela consiste na solidificação de resinas poliméricas líquidas por reticulação fotolitográfica, ou seja, a cura da resina ocorre por incidência de uma fonte de energia no formato da peça que se deseja produzir [64]. A figura 2.3 mostra um exemplo de equipamento típico de fotopolimerização por cuba. Para a produção de peças cerâmicas nessa técnica de MA, é necessário a presença dos materiais na forma de pó, misturados na resina fotopolimérica [64,65]. Por ser um processo já consolidado, a SLA possui alta qualidade de processamento, podendo produzir peças por camadas de até 20 μm de espessura [60].

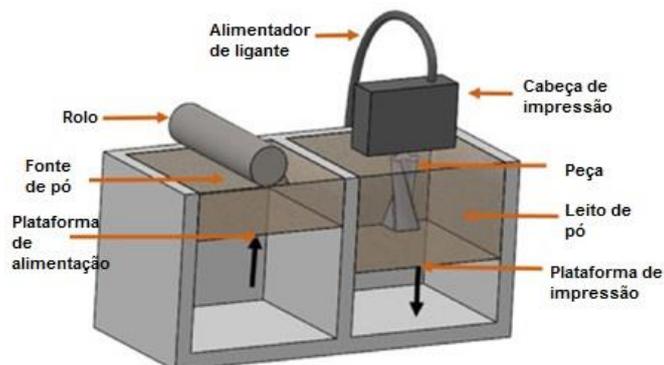


Fonte: Adaptado de [62].

Figura 2.4 - Esquema de equipamento de MA por fotopolimerização em cuba.

Jateamentos de Ligante e de Material

Um outro processo de MA é o jateamento de ligante (ou jateamento de *binders*), que funciona com o espalhamento de um ligante líquido específico em uma área de leito de pó seguindo o projeto geométrico definido pelo software. O objetivo deste processo é construir peças à verde por ligação física ou química seletiva dos ligantes em camadas de material na forma de pó, para que se forme o produto final após um o processamento térmico. A Figura 2.4 mostra um exemplo do equipamento de impressão por jateamento de *binders*.



Fonte: Adaptado de [66].

Figura 2.4 - Esquema de equipamento de MA por jateamento de ligante.

Nesse processo, a impressão pode envolver gotejamento por demanda, pelo qual gotas de líquido são dispersas pelo leito controladamente, ou ocorrer por jato contínuo, que vaporiza o ligante expandindo seu volume e o jateamento sobre a área desejada [47,66–68]. Os ligantes podem ser orgânicos (resinas de cura) ou inorgânicos (gel coloidal) e também aglutinantes ácido-base, de sais metálicos e de solventes. Podem também serem utilizados no leito de impressão, na mudança de fase e na inibição de sinterização, caracterizando-os por seu mecanismo de ligação [66].

Um processamento análogo faz jateamento de material, ao invés do ligante. Essa estratégia funciona pela deposição seletiva de gotículas de material sobre uma plataforma de construção, semelhantemente ao processo de impressão 2D em papéis². Nesta técnica, a produção e utilização dos materiais cerâmicos estão relacionados com sua presença na forma de partículas da suspensão ou do polímero que é gotejado [47,68].

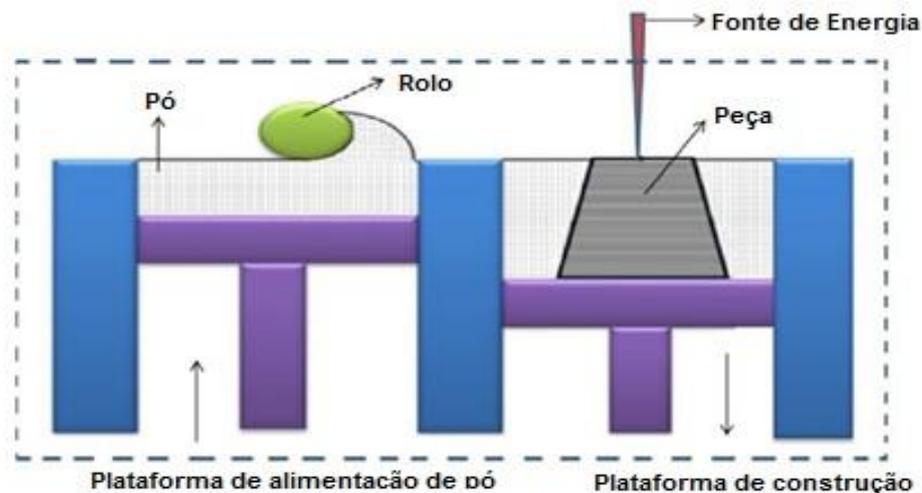
Relativamente ao desenvolvimento de produtos, é possível também utilizar cerâmicas suspensas nos ligantes líquidos para fabricar a peça. Segundo Hwa [69], esta abordagem foi realizada para fabricar produtos cerâmicos de alumina e zircônia por meio de uma impressora de jato de tinta modificada [70]. Analogamente, Khalyfa *et al.* [71], usaram de pós cerâmicos de fosfato tetracálcio (TTCP) como ligante e sulfato de cálcio ou fosfato de cálcio como matéria-prima para fabricação de *scaffolds* porosos usados na ETO.

Fusão de Leito em Pó

A Fusão de Leito em Pó (PBF, em inglês) se utiliza de uma fonte de energia direta para depositar, fundir e solidificar simultaneamente o material a ser impresso, podendo estar na forma de filamento ou em pó [47,72]. O sistema é constituído pela fonte de energia (laser ou feixe de elétrons), que fornecerá energia na forma de calor para unir o pó, um sistema ótico de focalização da fonte de energia, uma plataforma de impressão, um rolo que auxilia no

² Equipamentos desta tecnologia comercialmente disponíveis são da ExOne [100] e VoxelJet [101].

abastecimento de matéria-prima e uma câmara de construção. A Figura 2.5 mostra um esquema típico do equipamento de PBF.



Fonte: Adaptado de [63].

Figura 2.5 - Esquema de equipamento de MA por fusão de leito de pó.

As duas principais técnicas utilizadas nesta categoria de MA são a sinterização seletiva a laser (SLS) e a fusão seletiva por laser (SLM). O método SLS utiliza um laser de alta energia para derreter seletivamente as finas camadas de partículas cerâmicas [69]. O processo consiste em uma camada de material na forma de pó ser espalhada em um leito que está aquecido e, por meio de um sistema ótico, um feixe de laser se move para fundir cada camada seguindo o modelo CAD. A fusão do material ocorre pelo aumento da temperatura local resultado da interação do laser com as partículas.

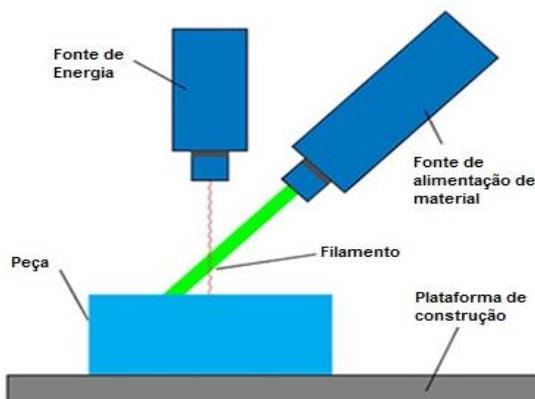
A principal característica do processamento por SLS se dá por produzir cerâmicas complexas, por este motivo é uma opção viável na produção de *scaffolds* biocerâmicos. Hwa *et al.* [69] descreve peças de nano-Hidroxiapatita com poli-e-caprolactona (PCL) produzidas por este método com poros projetados e ordenados, sendo alguns microporos interconectados. Outra vantagem da SLS é que o processo não modifica a porosidade das partículas cerâmicas iniciais, porém há a necessidade da utilização de ligantes que agem no sistema para diminuir o ponto de fusão das cerâmicas.

O processo de impressão por SLM se utiliza do laser em alta potência para fundir completamente as partículas de pó cerâmico, e assim produzir peças de alta densidade. Desse modo, o equipamento coloca uma camada de pó cerâmico que é depositada em uma placa de substrato e fundida seletivamente seguindo os padrões do arquivo CAD. O calor é gerado localmente pelo laser focalizado, o que gera grandes gradientes térmicos e tensões locais, sendo estas as principais desvantagens do uso desta técnica para PBF [66].

Bose [66] comenta em seu trabalho que o principal equipamento comercial disponível para SLM e SLS é o revestimento por modelagem de rede por engenharia de laser (LENS™). Ele utiliza um laser de alta potência (até 4kW) que age em pontos de convergência do leito para derreter o pó, formando uma poça micro fundida. Esta poça se solidifica instantaneamente e adere a base ou substrato que se move nos eixos x e y, formando a área de impressão.

Deposição de Energia Direcionada

Semelhantemente ao PBF, a deposição de energia direcionada (DED, em inglês) é uma MA na qual energia térmica focalizada é usada para fundir material quando estes são depositados. Assim, um bocal é usado para depositar material, em filamento ou pó, na plataforma de impressão, e um sistema de energia (laser, feixe de elétron ou arco de plasma) funde o material após a sua deposição [73]. A Figura 2.6 mostra um esquema típico destes equipamentos.

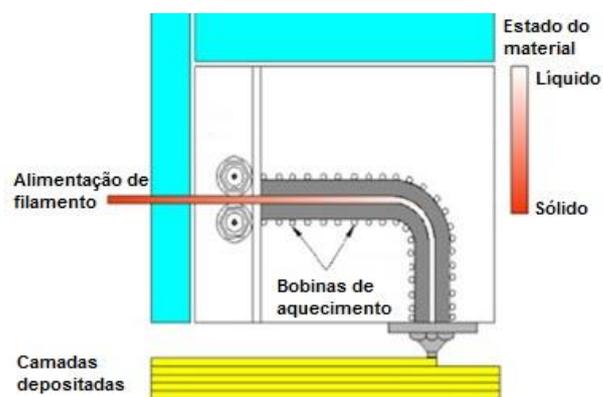


Fonte: Adaptado de [70].

Figura 2.6 - Esquema de equipamento de MA por deposição direta de energia.

Modelagem por Deposição de Fundido

A modelagem por deposição de fundido (FDM, em inglês), também conhecida como MA por extrusão, é considerada a técnica mais popular de impressão 3D pela facilidade de processamento e baixo custo. O processo consiste no aquecimento ou amolecimento de um material polimérico termoplástico até a sua fluência e com isso, extrudando-o através de um bocal na geometria desejada para criar camadas da peça [47,66,67,74]. A Figura 2.7 mostra um equipamento típico desta técnica.



Fonte: Adaptado de [63].

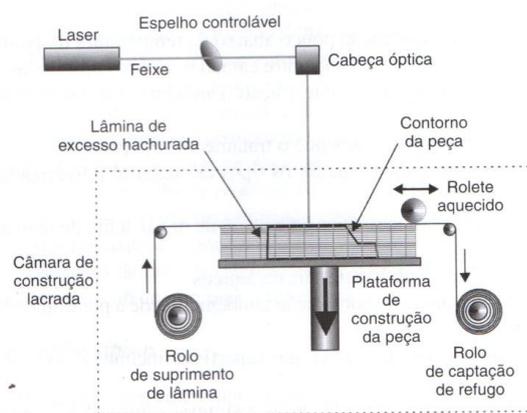
Figura 2.7 - Esquema de equipamento de MA por extrusão de material.

Uma técnica modificada deste processo que utiliza a deposição fundida de cerâmicas (FDC) tem sido desenvolvida e utilizada para processar estruturas cerâmicas verdes. A FDC é possível de ser realizada pois o filamento polimérico está carregado com pós cerâmicos. O processamento é igual ao de MA por extrusão comum, salvo a presença das cerâmicas no filamento. Entretanto, necessita de pós-processamento por meio de sinterização para a remoção do polímero e a subsequente densificação da peça cerâmica [69].

Laminação de Folhas

O último processo de MA descrito na norma é a laminação de lâminas (LOM, em inglês). Este processo utiliza a matéria-prima na forma de folhas com um adesivo entre as camadas para produção da peça. A folha é colocada na

plataforma de construção e, com o auxílio de roletes aquecidos, a lâmina adere na superfície de impressão por pressão. Em sequência da montagem, um feixe de laser guiado por um sistema ótico faz o corte do material na geometria desejada [47,75,76]. Um exemplo do equipamento deste processo é mostrado na Figura 2.8. Para os materiais cerâmicos produzidos por esta técnica, podemos citar fitas de cerâmicas monolíticas (carboneto de silício, por exemplo) e fibras contínuas de compósitos de matriz cerâmicos como matéria-prima [77].



Fonte: [73]

Figura 2.8 - Esquema de equipamento de MA por Laminação de Folhas.

2.4 Prospecção tecnológica baseada em indicadores científicos

A prospecção tecnológica é um campo de pesquisa que se ocupa de desenvolver e aplicar métodos e técnicas de coleta, triagem e análise da informação visando compreender o ambiente tecnológico no qual uma organização ou país está inserida. Com isso, é possível diagnosticar potenciais tecnologias que poderão se tornar produtos e serviços. Dadas as incertezas inerentes do desenvolvimento tecnológico, a prospecção tecnológica objetiva a minimização de incertezas, o subsídio à tomada de decisões, e o planejamento estratégico e operacional [78,79].

Com o advento da internet e a criação de bases de dados eletrônicas contendo grande volume de informação técnico-científica indexada, tais como periódicos científicos, documentos de patentes e outras fontes, técnicas quanti-

qualitativas de análise passaram a fazer parte do universo de pesquisas em prospecção tecnológica [78]. Neste sentido, busca-se estruturar informações para avaliar as oportunidades, o desempenho e o impacto de uma tecnologia, distinguir características futuras de mercados e entender o cenário de um processo produtivo e tecnológico [79,80]. No contexto da engenharia de materiais, os resultados decorrentes de estudos científicos proporcionam relatórios técnicos com informações de alto valor estratégico, das quais se beneficiam os projetos em engenharia e a seleção de materiais ou processos [81].

A análise das informações é feita por meio da bibliometria, que é uma técnica que busca quantificar a comunicação técnico-científica registrada, como por exemplo os artigos científicos e os documentos de patentes. O processo analítico da bibliometria é semelhante ao da prospecção tecnológica, iniciando-se pela recuperação da informação, coleta dos dados, tratamento da informação e elaboração e análise da informação. Como o processo de tratamento bibliométrico depende de conhecimentos tácitos decorrentes da experiência humana, a bibliometria pode ser classificada como uma técnica quanti-qualitativa [79,81,82].

Atualmente, a bibliometria se utiliza do processamento em software especializado para gerar contagem e estatísticas dos atributos inerentes à informação, permitindo a criação de listas e matrizes com o cruzamento desses dados. Em um segundo estágio, estas listas e matrizes podem ser processadas em outros softwares com o intuito de melhor visualização e realização de outros tratamentos estatísticos. Desse modo, a criação de indicadores gráficos ou em redes de coocorrência de informação contribuem para a sintetização visual e para a análise [40,42,43]. Com estas questões e conceitos revisados, a bibliometria resulta, por exemplo, em indicadores científicos e tecnológicos, mais conhecidos por avaliar diferentes sistemas nacionais ou internacionais de Ciência e Tecnologia (C&T).

Os indicadores são medidas indiretas que permitem avaliar o tópico que se deseja pesquisar por meio de análise estatística de tendências e identificação de padrões a nível comercial, tecnológico e de pesquisa científica [79,83,84]. No

que diz respeito a C&T, os indicadores científicos são utilizados para avaliar uma metodologia e o grau de maturação de uma ciência ou técnica pela parametrização quantitativa de processos e associações de causa e efeito de informações de registros bibliográficos. [85].

Os indicadores desenvolvidos por meio de publicações científicas como fonte de informação são denominados indicadores de resultados [86]. Estes se baseiam em duas medidas principais dos registros bibliográficos, a frequência e a coocorrência. Enquanto a frequência computa o número que um elemento aparece no registro, a coocorrência faz a contagem de elementos que ocorrem simultaneamente. Em complemento, os indicadores podem ser divididos pelo perfil de análise que podem ter. Sendo assim, Faria [86] define três tipos de indicadores:

- Indicadores de Atividade: são criados pela contagem dos registros recuperados e geralmente são apresentados em listas de frequência ou *rankings* por períodos determinados de tempo. São usados para elencar pesquisadores, países, instituições e empresas com o intuito de relacionar a evolução de cada um deles para compreensão do dinamismo do tema estudado;
- Indicadores de Impacto: medem os dados referentes às citações das publicações ou que um autor teve. Esses indicadores são referência para qualidade de pesquisas, autores, instituições, grupos de estudos e países em um determinado tópico científico;
- Indicadores de Ligação ou Relacionais: organizados em matrizes de coocorrência de publicações científicas, citações e palavras. São apresentados na forma de mapas e redes de relacionamento com o objetivo de compreender as colaborações científicas entre grupos de pesquisadores, instituições e países.

Em um estudo bibliométrico para manufaturas aditivas, Lezama [87] se utilizou da curva de ciclo de vida tecnológico para conseguir estimar quantitativamente o nível de maturidade tecnológica das MA. Para tanto, os autores utilizaram, como fonte de informação, registros de patentes e publicações científicas de tecnologias consolidadas (estabelecidas pelo

referencial teórico como maduras). Após o processamento desses dados, foi criada uma escala de Nível de Prontidão Tecnológica (*TRL*, em inglês). Esta escala define três estágios do estado de uma tecnologia, sendo: (i) Emergente, compreendendo pesquisas científicas e com *TRL* entre 1 e 5; (ii) em Desenvolvimento/Crescimento, que geralmente estão registradas na forma de patentes e tem *TRL* de 6 ou 7; e (iii) Maduras, que são tecnologias com registros em produtos ou análises de mercado que possuem *TRL* 8 ou maior. Neste estudo, os processos de MA se concentram em 3 faixas da escala, sendo:

- *TRL* 1-2: Laminação de folhas e jateamento de ligante;
- *TRL* 4-5: Deposição direcionada de energia; e
- *TRL* 6-7: Extrusão de material, jateamento de material, fusão de leito em pó e polimerização em cubas.

A principal objetivo desse trabalho foi ter conseguido, por meio de um meio bibliométrico, confirmar que estas tecnologias ainda não são maduras, mesmo que desenvolvidas desde meados dos anos 1980. Desse modo, é possível compreender que há de fato a necessidade de um estudo de prospecção tecnológica no tópico.

A bibliometria também é utilizada no meio biomédico, como exemplo disso é o estudo envolvendo biomateriais cerâmicos desenvolvido por Yu *et al* [88]. Neste, os autores utilizaram como fonte os dados bibliográficos publicações científicas sobre zircônia indexados na base de dados PubMed™. [88]. Um procedimento metodológico importante nele realizado foi gerar alguns dos indicadores de coautoria de cientistas chineses, dada a quantidade de homônimos que desafiam o tratamento de informação. Esta escolha de análise serviu para mapear as publicações na sua língua materna e inglês em correlação aos países de colaboração. Assim, quantificar o número de autores preocupados com o fator de impacto de suas pesquisas por meio de cooperações com países, centros e periódicos científicos referencias mundiais.

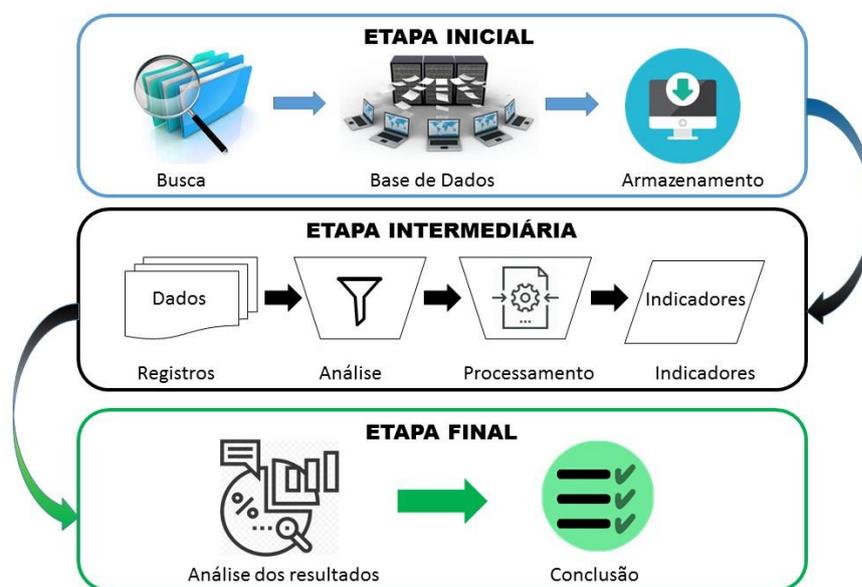
Outro estudo bibliométrico foi o liderado pelo médico Wen *et. al* [89], que por meio do tratamento bibliométrico avançado de títulos e resumos, mapeou os principais materiais que estavam sendo utilizados processamento por MA utilizando pó para *scaffolds* na ETO [89]. Ele percebeu que havia uma

possibilidade da utilização da MA como uma solução de impasses técnicos na área da saúde. Para tanto, resolveu levantar os materiais e técnicas existentes em publicações técnicas para definir quais eram as principais opções existentes, com detalhamento de propriedades físico-químicas e biológicas, para uma possível utilização prática da técnica.

Como qualquer processo, é inerente que a bibliometria possui limitações. Entre outros motivos, as deficiências no procedimento dizem respeito (i) ao desequilíbrio de cobertura entre as publicações por áreas do conhecimento; (ii) predominância do idioma inglês nas publicações, fazendo com que cientistas que não dominam esta língua ou de países periféricos à cena principal acabem por publicar em revistas não indexadas; (iii) a bibliometria não é a principal finalidade das bases de dado (divulgação da ciência); (iv) nem toda as inovações ou inventos patenteados são descritos ou publicados, limitando a abrangência das fontes de informação; (v) apesar de existir o fator de impacto, a concepção de qualidade de publicações (ou falta dela) não é mensurável; (vi) mesmo existindo base de dados específicas, não há exaustividade na cobertura de tópicos científicos; e (vii) erros humanos inerentes no processo de indexação causam dificuldades durante o processamento da informação e elaboração dos indicadores [85,90,91].

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento metodológico geral utilizado nesta pesquisa está representado na Figura 3.1 e está dividido em três etapas principais. A etapa inicial consiste na recuperação de informações em uma base de dados de registros bibliográficos de publicações científicas. Na etapa intermediária, as publicações científicas recuperadas e armazenadas são processadas por softwares especializado em tratamento e visualização de indicadores, gerando informação de alto valor agregado. Na etapa final deste procedimento experimental, é realizada a análise dos indicadores tendo outras fontes de informação como suporte para compreender as tendências observadas.



Fonte: Adaptado de [76,80,88]

Figura 3.1 - Fluxograma do procedimento metodológico de recuperação de publicações científicas para prospecção tecnológica utilizada na presente pesquisa.

No processo geral desta metodologia, com a definição da expressão de busca se recuperou publicações científicas da base de dados Web of Science no período de 18 a 21 de dezembro de 2018, contabilizando uma amostra total de 2419 publicações científicas para o escopo de análise desta pesquisa.

3.1 Etapa inicial do procedimento experimental

3.1.1 Base de dados científicos e escopo de publicações científicas da dissertação

Pelo fato desta pesquisa possuir caráter interdisciplinar, a escolha da base de dados onde foi feita recuperação das publicações científicas levou este fato em consideração. Conseqüentemente, apesar do tema envolver biocerâmicas ou aplicações de cerâmicas na área da saúde, bases de dados como a PubMed™ não se mostrou aconselhável por ser específica a esta área, podendo correr o risco de deixar de fora outras pesquisas de importância publicadas em periódicos de outras áreas. Além disso, nas pesquisas exploratórias, verificou-se a PubMed não possui cobertura nos assuntos que regem os processamentos por manufatura aditiva de forma satisfatória.

Assim, a busca envolveu uma base cuja cobertura de assuntos é mais abrangente. Pelo fato de ser multidisciplinar e indexar mais de 12.000 periódicos com consulta a diversas coleções, como a Science Citation Index Expanded (SCI-Expanded), a base de dados Web of Science (WoS) da Clarivate Analytics foi escolhida. Além disso, ela é comumente utilizada em estudos bibliométricos [92], que é a técnica de análise de informação empregada na presente pesquisa. A WoS possibilita, ainda, a realização de uma busca mais completa, com publicações científicas e patentes. Contudo, optou-se por se utilizar apenas as publicações científicas como fonte de informação pelo fato dos estudos preliminares e de estudos como o de Lezama [87], mostrarem as técnicas de MA ainda em estágio de crescimento. Desse modo, apesar de um estudo exploratório conseguir fornecer informações mais complementares, a utilização de patentes no escopo de registros bibliográficos não acrescentaria dados substanciais para a análise final da dissertação.

3.1.2 Recuperação de informação e expressão de busca

O processo de recuperação da informação foi projetado inicialmente com base em estudos exploratórios, nos quais foram feitas buscas por publicações em periódicos e apresentações em eventos científicos. Nestes, foi verificado que filtrar o escopo de publicações científicas pela utilização de termos de engenharia de tecidos ósseos e de materiais que se encontra na literatura limita o volume de informação recuperado, o que se tornou um problema. Outro motivo para não se usar termos relacionados à ETO se dá pela limitação de um panorama mais amplo que deixaria de ser traçado por desconsiderar publicações que não mencionariam tais termos, minimizando *insights* e uma análise mais acurada. Pelos mesmos motivos, palavras e termos associados à biocerâmicas limitaram consideravelmente a busca.

Após os estudos exploratórios, optou-se pela utilização apenas dos termos de busca associados aos processos de MA como estratégia de busca. Com isso, se obteve todo um universo de publicações científicas sobre o tema, sendo as biocerâmicas mapeadas na etapa de processamento da informação empregando técnicas avançadas.

A estratégia de busca final utilizada na presente pesquisa é mostrada a Tabela 3.1. Os principais termos levantados na literatura referentes à pesquisa e que fazem parte da expressão de busca, dizem respeito aos processos existentes na ASTM 52900:2015 [61], termos extraídos por mineração de texto utilizadas nos estudos exploratórios e pelos termos definidos no referencial teórico específico da área. Todos esses termos passaram pela avaliação de três especialistas na área de MA, validando a expressão de busca. Maiores detalhes do procedimento de produção da expressão de busca estão descritos no Apêndice B. Os registros bibliográficos recuperados na utilização da expressão de busca na WoS foram armazenados no computador local para tratamentos posteriores da informação.

Tabela 3.1 - Termos selecionados e expressão de busca da dissertação.

#	Terminologia do Processo de MA	Expressão utilizada na WoS
#1	3D Laser Cladding	TS= ("3d laser cladding")
#2	3D Printing	TS = ("3d print*")
#3	Additive Manufacturing	TS = ("additive manufactur*")
#4	Automated Fabrication	TS= ("automated fabrication" OR autofab)
#5	Ballistic Particle Manufacturing	TS = ("ballistic particle manufactur*")
#6	Binder Jetting	TS = ("binder jett*")
#7	Ceramic Laser Sintering	TS = ("ceramic* laser sinter*")
#8	Computer Aided Design Manufacturing	TS= ("computer aided design manufactur*")
#9	Direct Digital Manufacturing	TS= ("direct digital* manufactur*")
#10	Direct Ink Printing	TS = ("direct ink print*")
#11	Direct Ink Writing	TS= ("direct ink writ*")
#12	Direct Metal Deposition	TS= ("direct metal deposit*")
#13	Direct Metal Laser Sintering	TS= ("direct metal laser sinter")
#14	Directed Energy Deposition	TS = ("direct* energy deposit*")
#15	Directed Light Fabrication	TS = ("direct* light fabric*")
#16	Direct-Write Assembly	TS= ("direct write assembly")
#17	Electron Beam Melting	TS= ("electron beam melt*")
#18	Freeform Fabrication	TS= ("freeform fabricat*")
#19	Freeze Form Extrusion Fabrication	TS= ("freeze form extrusion fabricat*")
#20	Fused Deposition Modeling	TS = ("fuse* deposit* model*")
#21	Laser Aided Manufacturing	TS= ("laser aided manufactur*")
#22	Laser Cusing	TS = ("laser cusing")
#23	Laser Engineered Net Shaping	TS = ("laser engin* net shap*")
#24	Laser Metal Deposition	TS = ("laser metal deposit*")
#25	Laser Prototyping	TS= ("laser prototyp*")
#26	Layered Manufacturing Technique	TS= ("layer manufactur*")
#27	Mask-Less Projection Slurry Stereolithography	TS= ("maskless project* slurry stereolithography" OR "mask-less project* slurry stereolithography")
#28	Material Jetting	TS= ("material jet*")
#29	Microstereolithography	TS = (microstereolitograp*)
#30	Mold Shape Deposition Manufacturing	TS= ("mold shape deposit* manufactur*")
#31	Multi-Jet Modeling	TS= ("multi jet model* ")
#32	Multiphase Jet Solidification	TS= ("multiphase jet solidific*")
#33	Powder Bed Fusion	TS = ("powder bed fus*")
#34	Powder Layer Manufacturing	TS= ("powder layer manufactur*")
#35	Rapid Casting	TS= ("rapid cast*")
#36	Rapid Prototyping	TS= ("rapid prototyp*")
#37	Robocasting	TS = (robocast*)
#38	Selective Inhibition Sintering	TS = ("select* inhibit* sinter*")
#39	Selective Laser Melting	TS = ("select* laser melt*")
#40	Selective Laser Sintering	TS = ("select* laser sinter*")
#41	Selective Mask Sintering	TS = ("select* mask sinter*")
#42	Sheet Lamination	TS = ("sheet laminat*")
#43	Solid Freeform Fabrication	TS= ("solid freeform fabricat*")
#44	Stereolithography	TS= (stereolithograph*)
#45	Three Dimensional Powder Printing	TS= ("three dimensional powder print*" OR "3D powder print*" OR 3DPP)
#46	Two Photon Stereolithography	TS= ("two photon stereolithography")
#47	Ultrasonic Additive Manufacturing	TS= ("ultrasonic additive manufactur*")
#48	Ultrasonic Consolidation	TS= ("ultrasonic consolid*")
#49	Vat Photopolymerization	TS= ("vat* polymer*")
#50	Bioceramic	TS= (biocer*)
#51	Ceramic	TS = (ceramic*)
#52	#1 OR #2 OR #3 OR #4 OR #5 OR #6 OR #7 OR #8 OR #9 OR #10 OR #11 OR #12 OR #13 OR #14 OR #15 OR #16 OR #17 OR #18 OR #19 OR #20 OR #21 OR #22 OR #23 OR #24 OR #25 OR #26 OR #27 OR #28 OR #29 OR #30 OR #31 OR #32 OR #33 OR #34 OR #35 OR #36 OR #37 OR #38 OR #39 OR #40 OR #41 OR #42 OR #43 OR #44 OR #45 OR #46 OR #47 OR #48 OR #49 OR #50)	
#53	#53 AND (#51 OR #52)	

Fonte: Autor pela formatação da expressão de busca na WoS.

O processo de pesquisa dos termos na Web of Science foram feitos e uma análise do retorno (número de publicações científicas por termo) é feita para melhorar a recuperação de dados e, conseqüentemente uma melhor análise nas etapas subsequentes. Desse modo, se decidiu não utilizar as siglas dos termos da expressão de busca, para evitar ruídos inerentes ao processo de pesquisa. Um exemplo desse processo foi a sigla “AM”, referente à manufatura aditiva em inglês, que estava remetendo a pesquisas de radiofrequências ou filtros analógicos eletrônicos.

Na base de dados, os termos pesquisados estavam sendo utilizados na opção de “pesquisa avançada” existente. Nesta, foi definido como padrão todas línguas, todos os tipos de documentos, todos os anos (1945-2019) e as coleções: Science Citation Index (SCI-Expanded), Conference Proceedings Citation Index (CPCI-S) e Emerging Sources Citation Index (ESCI).

Com os termos completos, por meio do Portal de Periódico da CAPES foi possível fazer o *download* dos registros das publicações científicas indexados na Web of Science.

3.2 Etapa intermediária do procedimento experimental

3.2.1 Equipamentos e Softwares utilizados para o processamento de registros bibliométricos

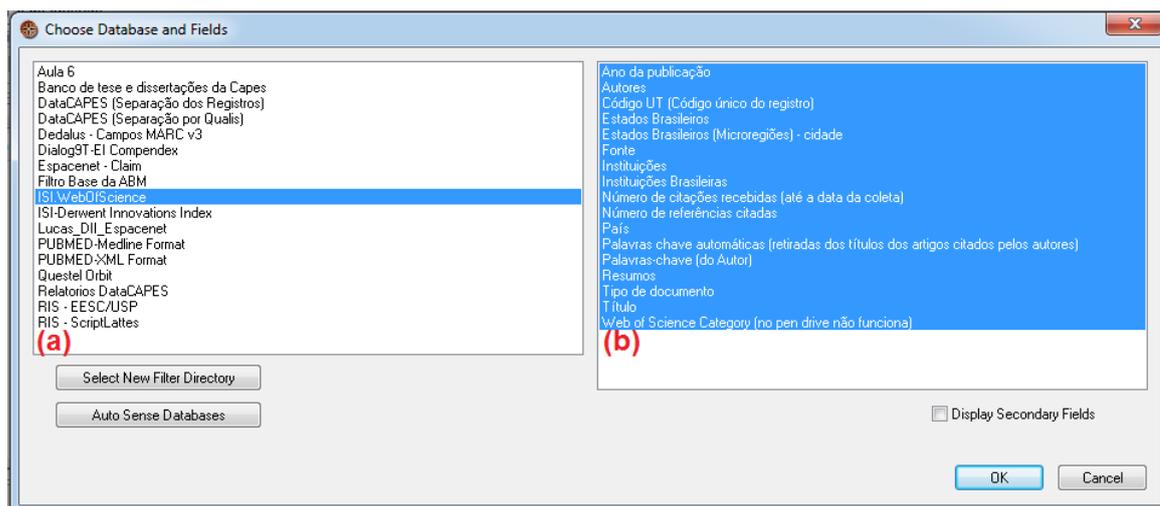
Na realização do procedimento experimental desta dissertação, as instalações do Núcleo de Informação Tecnológica em Materiais (NIT/Materiais) do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos foram utilizadas para fazer a aquisição e processamento das informações contidas nos registros bibliográficos das publicações. Em um notebook pessoal de configuração comercial (Intel Core I5 2,53Ghz, Windows 7 Home Basic, 4 Gb de RAM), foram instalados e utilizados os softwares utilizando as licenças do NIT/Materiais:

- **VantagePoint** (v. 5.01)³ para transformar os arquivos extraídos da base de dados em um documento em que possam ser criadas listas e matrizes de informação organizada e estruturada;
- **Microsoft Office Excel** (versão 2013) para a realização do processamento estatístico das publicações científicas obtidos nas etapas anteriores da metodologia. A escolha deste software se deu pela facilidade em que se é possível tratar dados com a existência de funções matemáticas e estatísticas presentes no software. Além disso, outras funções de classificação e filtragem serviram para construir tabelas dinâmicas e gráficos para representação das publicações científicas;
- **VOSViewer** (Versão 1.6.9) para construção e visualização de redes bibliométricas. Sendo assim, após os processamentos realizados nos outros softwares, a apresentação em clusters das publicações científicas facilita a avaliação da relação entre as áreas de estudo e outras informações, tais como publicações entre países.

3.2.2 Importação e pré-processamento de registros bibliométricos

Foram importados no software VantagePoint (v.5.0) os registros bibliográficos recuperados, sendo utilizado o filtro específico para a base de dados “ISI WebOfScience”, cujos principais campos são mostrados na Figura 3.2(a). Assim, os dados de cada registro recuperado da base de dados foram classificados nos campos mostrados na Figura 3.2 (b).

³ O software é privado, porém está disponível para utilização em pesquisas realizadas no âmbito do NIT/Materiais.



Fonte: Autor por acesso ao Software Vantage Point pelo NIT/Materiais.

Figura 3.2 - Captura de tela do Software VantagePoint v.5.0, com o filtro de base de dados (a) e os respectivos campos de análise (b).

3.2.3 Filtragem e Categorização

Uma segunda etapa importante é a classificação e agrupamentos de campos existentes no software. Como parte desta pesquisa consiste na análise a contribuição do Brasil no cenário mundial, um segundo agrupamento das pesquisas brasileiras foi criado para conseguir comparar os dados. Em suma, os principais agrupamentos que foram analisados dizem respeito ao ano de publicação, instituições, países e palavras-chave do autor e automáticas (processadas pelo software).

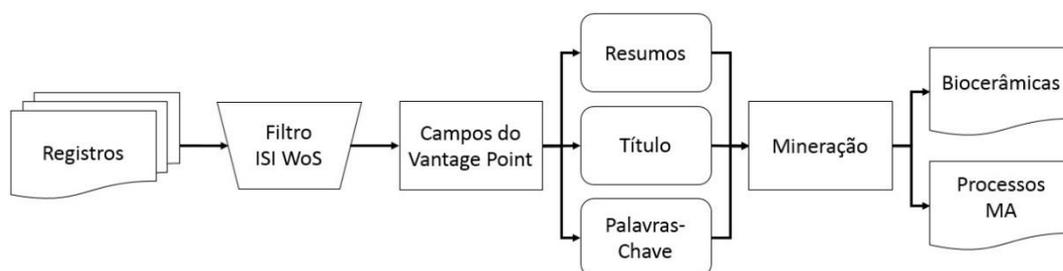
Estas listas agrupadas foram apresentadas por períodos regulares (quinquênios) para melhor acompanhamento da evolução das pesquisas. Após o processo de tratamento e agrupamento da informação pelo VantagePoint, as listas e matrizes produzidas foram exportadas para os softwares auxiliares, gerando estatísticas e indicadores de publicações científicas.

Para tentar compreender a conjuntura, países e centros de excelência que realizam pesquisa em biocerâmicas e MA, um indicador referente a essas organizações foi criado no software VantagePoint. Após a limpeza e classificação, foi possível identificar mais de 50 países e 1.000 centros de

pesquisa acadêmicos ou empresas. Em complemento, pelo processamento no software VOSviewer, criou-se redes de colaboração por coocorrência entre as nações. Este gráfico auxilia na análise das relações mundiais e brasileiras no que diz respeito às pesquisas científicas, pois cada nação foi representada por um nó e as ligações entre estes mostra a dinâmica entre os países. Assim, o gráfico de redes foi utilizado para compreensão da dinâmica do cenário mundial, visto que há proporcionalidade entre os tamanhos de nó e força de ligação entre cada relação. Uma análise análoga foi realizada para as instituições mundiais e brasileiras, que foram listadas no processo anterior de filtragem e classificação.

3.2.4 Mineração de texto para mapeamento dos processos de MA e das biocerâmicas

A mineração de texto, no âmbito desta metodologia, foi utilizada diretamente para fazer o levantamento dos materiais que estão sendo utilizados pelos processos de MA definidos em norma. A figura 3.3 mostra o procedimento específico de mineração de dados que se tem por objetivo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.3 - Etapas do processamento de Mineração de Texto para mapeamento de materiais e processos de MA.

Com o auxílio da funcionalidade “Processamento de Linguagem Natural” do VantagePoint, foram extraídos dos campos “Resumo” e “Título” palavras substantivadas. Com o resultado desse processamento, aplicados a esses dois

campos e somados ao campo de “Palavras Chave do Autor”, um conjunto de termos e palavras substantivadas foi obtido e adicionado a um novo campo denominado “Mineração de Texto”. Esse novo campo apresentou uma lista de 56.060 expressões e, pela extensão, se decidiu utilizar apenas termos que ocorriam em até 1% (5 ocorrências ou mais), tornando o escopo final de análise para o campo contendo 2.560 entradas.

3.3 Etapa final do procedimento experimental

3.3.1 Indicadores bibliométricos de publicações científicas elaborados via mineração de dados

Com base no resultado de classificação descrito anteriormente, indicadores bibliométricos foram desenvolvidos para a compreensão do cenário mundial e brasileiro de biocerâmicas produzidas por MA. São estes:

- Evolução temporal das publicações científicas mundiais e brasileiros em manufatura aditiva, no período de 1993 a 2018 (25 anos);
- Comparativo temporal das publicações brasileiras frente às mundiais, com análise da participação percentual do total em período quinquenal;
- Os 20 principais países que possuem pesquisas científicas neste cenário, analisando os do Brasil com 5 mais recorrentes;
- Colaboração em pesquisas científicas do Brasil com outros países;
- Quais as instituições mundiais que mais pesquisam a temática desta pesquisa, assim como a perspectiva dessas instituições no Brasil, com uma análise da característica das ICTs.

3.3.2 Indicadores bibliométricos avançados de publicações científicas elaborados via mineração de texto

Para a construção dos indicadores avançados de publicações científicas, o campo de “Mineração de Texto” foi utilizado em dois momentos diversos. Em um primeiro período, utilizando-se das funcionalidades de agrupamento e tesouros do software, foram criados sete grupos para associar os termos referentes aos processos definidos pela norma [61] e mais três termos gerais para MA. Sendo assim, deste campo se obteve uma lista contendo o número de publicações científicas que continham e agrupavam os termos referentes aos processos de interesse desta pesquisa.

Por outro lado, o processo de mineração de texto para as cerâmicas foi mais extenso devido às diferentes composições cerâmicas que os artigos recuperados da base de dados tratavam. Logo, uma análise do campo de “Mineração de Texto” manual foi feita e se agrupou as cerâmicas em uma lista. Nos dados de publicações científicas mundiais, a lista apresentou 47 diferentes fases ou composições cerâmicas consolidadas no meio acadêmico e comercial ou cerâmicas que poderiam ser utilizadas na área da saúde como *scaffold*. Um processo análogo foi realizado para as publicações científicas brasileiras, conseguindo-se extrair uma listagem de 21 compostos cerâmicos.

Sendo assim, os principais indicadores avançados desta dissertação dizem respeito:

- Aos sete processos de manufatura aditiva definidos pela norma ASTM 52900:2015 [61], com mais três termos gerais deste tipo de processamento, comparando os publicações científicas mundiais e brasileiras;
- Ao número de ocorrência de cerâmicas que puderam ser extraídas destes termos, sendo feita uma análise de quais materiais possuíam aplicação na área da saúde (biocerâmicas) tanto no cenário mundial quanto no brasileiro;
- A representação de redes de coocorrência entre as diferentes perspectivas desta pesquisa, sendo possível assim analisar as

publicações científicas por países e materiais ou processos, MA e biocerâmicas entre outras possibilidades de análises.

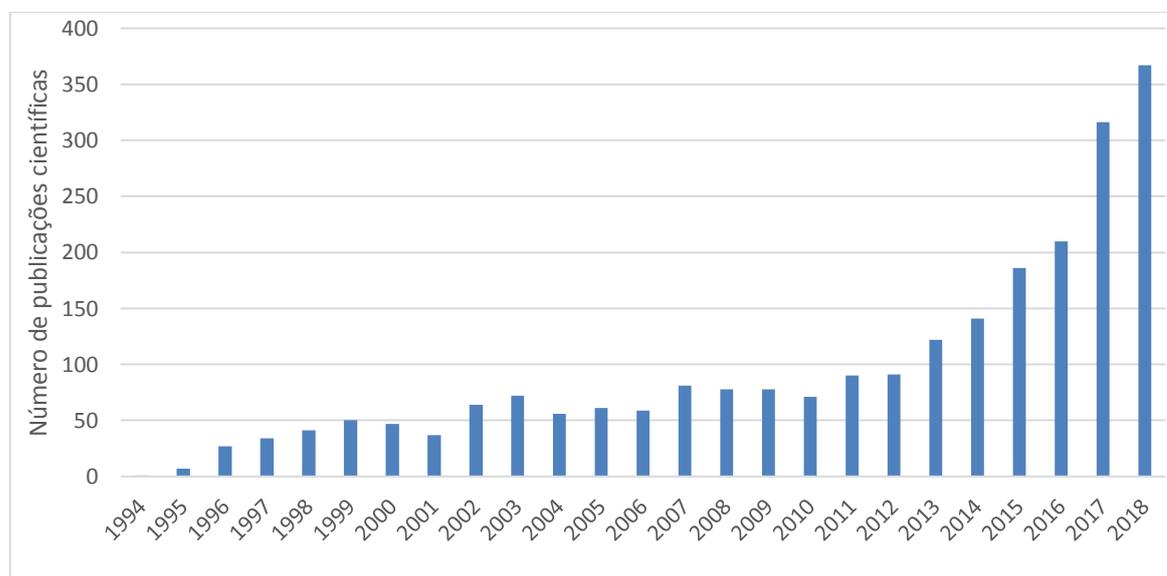
3.3.3 Consulta a especialistas

Ao longo do desenvolvimento da presente pesquisa, especialistas foram consultados em dois momentos. Inicialmente, o auxílio se deu no período de apresentação dos estudos exploratório em congressos, no qual se discutiu os detalhes de terminologia referentes aos processos de manufatura e a relevância da pesquisa. No segundo momento, os especialistas contribuíram diretamente nos resultados envolvendo os indicadores obtidos via mineração de texto. Com isso, para a aprovação dos mais de 100 termos de manufatura aditiva extraídos ao longo da pesquisa, três professores universitários (Apêndice B) foram consultados. Esta etapa foi de suma importância para os resultados da pesquisa, pois esta avaliação foi utilizada diretamente na estratégia de busca final, conforme descritas nas tabelas do Apêndice B sobre as siglas A1, A2 e A3, referente a cada especialista consultado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Panorama geral da produção científica em biocerâmicas aplicadas por manufatura aditiva

Apesar de diferentes vertentes de tecnologias análogas, o marco do desenvolvimento da manufatura aditiva, como é conhecido hoje, iniciou-se com o patenteamento do sistema de polimerização em cubas da Stratasys em meados dos anos 1980 [59,60]. Após este fato, houve um aumento substancial no número de pesquisas científicas e produtos diretamente relacionados à MA. Nos últimos 25 anos, a produção científica em MA tem crescido consistentemente, como pode ser visto na Figura 4.1.



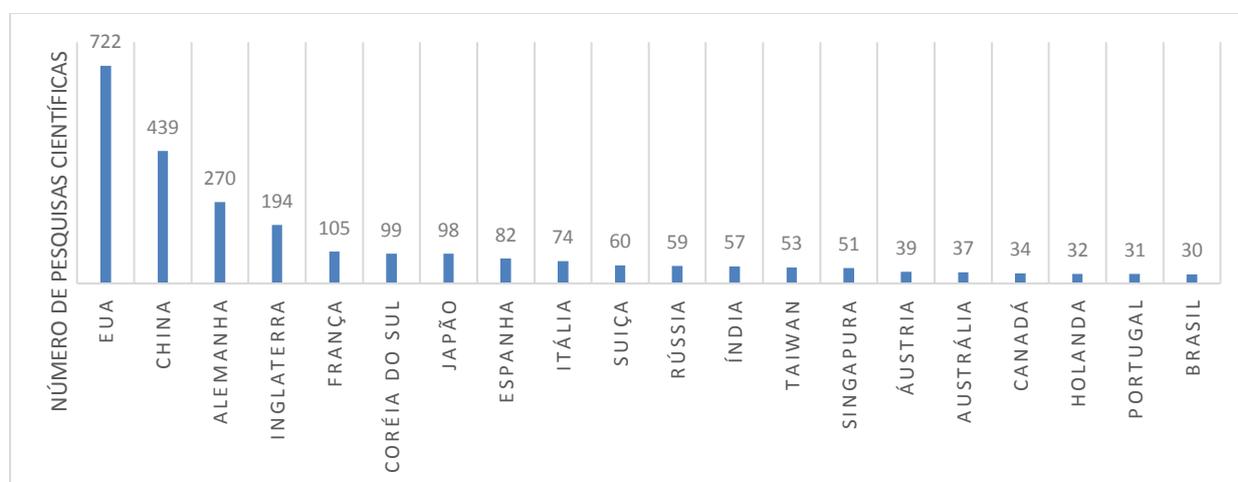
Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor.

Figura 4.1 - Número de publicações científicas mundiais no período de 1994 a 2018 na Web of Science.

No período entre 1994 e 2018, a média de publicações científicas a nível mundial de biocerâmicas aplicadas por manufatura aditiva foi de pouco mais de 90 por ano, ainda que seja evidente a concentração da produção científica nos últimos anos da análise. Esta constatação corrobora o estudo de Lezama [87],

que mostrou que a produção científica em MA possivelmente não atingiu um nível tecnológico de maturidade, tornando-se assim uma técnica em estado emergente. Portanto, há um gama de futuras soluções científicas para problemas tecnológicos inerentes a MA.

A Figura 4.2 apresenta os 20 principais países que contribuíram com pesquisas científicas e acumularam um conjunto de publicações científicas no período de análise (1994 a 2018). Os EUA lideram o ranking com 722 publicações científicas (24,91%), mostrando uma considerável diferença para a China (15,15%) e Alemanha (9,32%), enquanto o Brasil ocupa a 20ª posição neste levantamento, com 30 publicações.

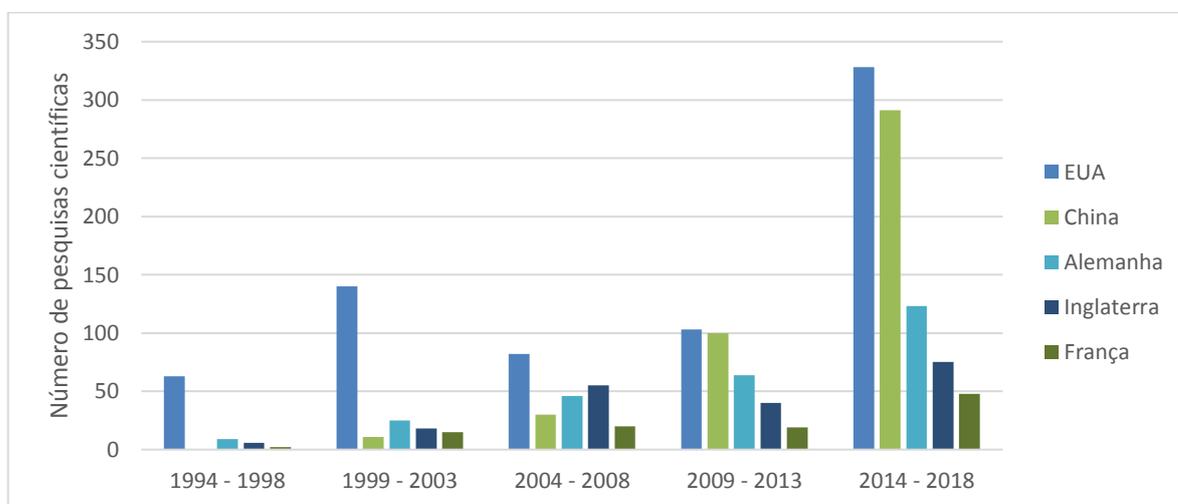


Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor.

Figura 4.2 - Os 20 principais países que possuem publicações científicas em biocerâmicas aplicadas por manufatura aditiva.

Para tentar compreender melhor a perspectiva dos cinco principais países pesquisadores de biocerâmicas aplicadas por MA, uma análise temporal da evolução destas pesquisas pode ser vista na Figura 4.3. Nela, é possível entender que o EUA sempre esteve à frente dos outros países, tendo grande relevância no segundo (1999 – 2003) e último quinquênio (2014 – 2018). Diferentemente do país norte-americano, a China possui um perfil crescente no número de publicações nessa análise, o que faz projetar uma equivalência nos patamares desses países. Tal resultado sugere que ambas nações possuem iniciativas de financiamento pública e privada para incentivo às pesquisas, com

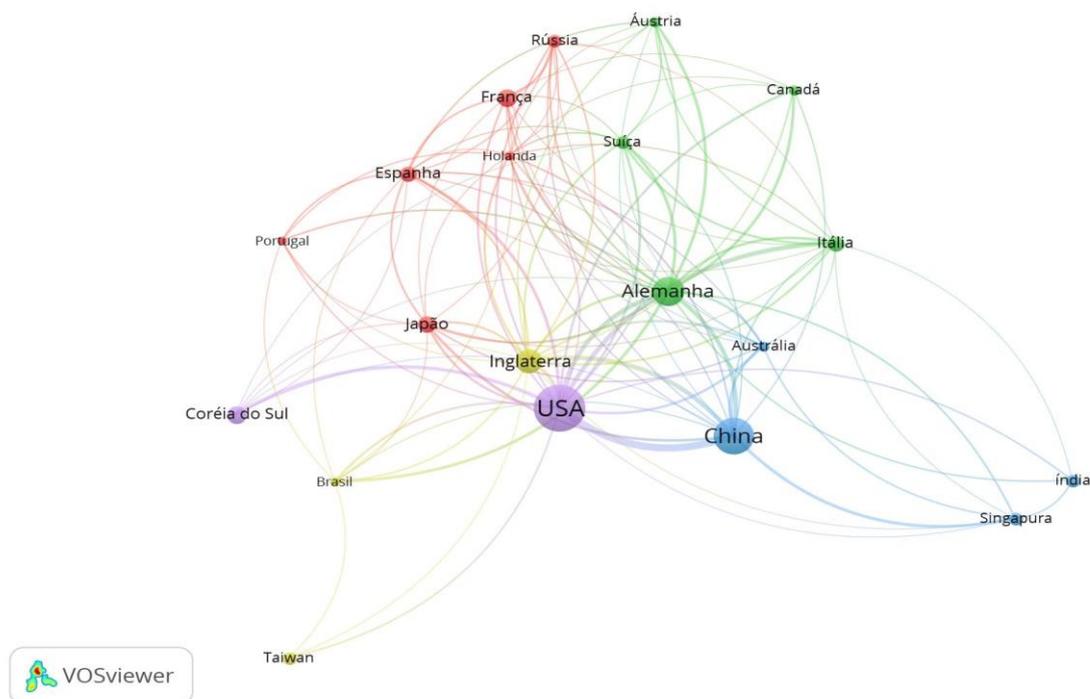
vista à solução de problemas técnico-científicos, além de avançar no conhecimento sobre os fenômenos inerentes ao processamento e comportamento dos materiais [93–95].



Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor.

Figura 4.3 - Publicações científicas dos 5 principais países pesquisadores de biocerâmicas aplicadas em MA no período de 1994 - 2018.

A Figura 4.4 mostra a rede de colaboração científica entre os 20 principais países que possuem pesquisa no contexto desta pesquisa. Verifica-se que EUA, China e Alemanha, que lideram o ranking de publicações científicas, formam uma tríade com os quais todos os demais países se relacionam. A Alemanha, apesar de não liderar as pesquisas, é o país europeu que possui maior poder nas suas relações (conexões) entre instituições e, possivelmente, nos tópicos de pesquisa. Deste modo, é possível dizer que seus contatos entre os pesquisadores e suas linhas de pesquisa são mais importantes do que de fato o número de artigos produzidos no período de análise.



Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor no software VOSviewer.

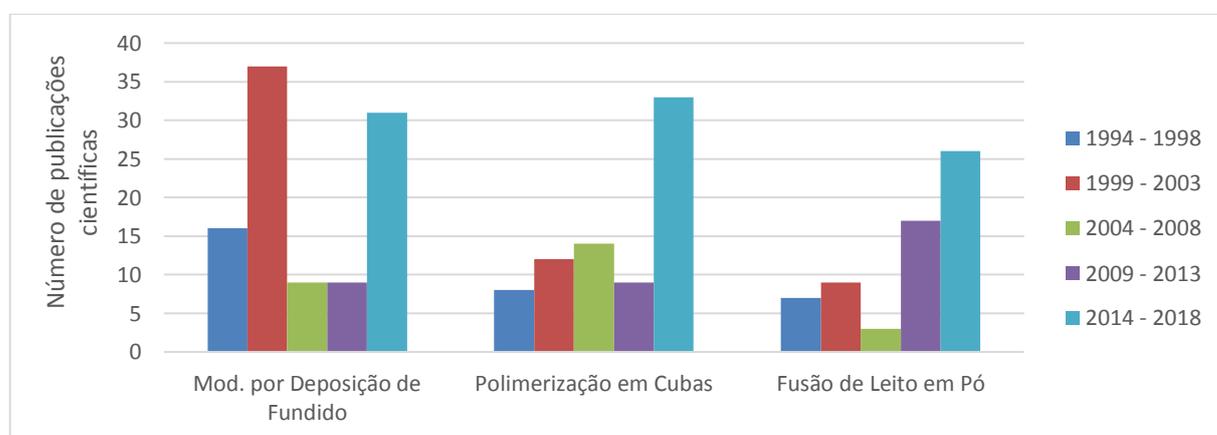
Figura 4.4 - Rede de colaboração dos 20 principais países que pesquisam biocerâmicas aplicadas por MA, sendo os EUA com maior força de ligação na rede (39,40%).

Diferentemente dos outros quatro principais países, os EUA se destacou no processo de Modelagem por Deposição de Fundido (FDM, em inglês), comumente denominada como extrusão de material. A Universidade Estadual de Nova Jérsei (chamada também de Universidade de Rutgers) foi a principal responsável pelas pesquisas americanas no referido processo, visto que 44,11% da produção científica é atribuída a tal instituição de pesquisa. A Universidade de Rutgers se tornou referência no assunto por ter sido pioneira no desenvolvimento da técnica de Modelagem de Deposição de Cerâmicas (FDC em inglês). As primeiras pesquisas se deram em 1996 para avaliação da qualidade estrutural de peças produzidas pela técnica por diversos autores [96] entre eles Ahmad Safari, que esteve em 86,67% das publicações da instituição. As principais linhas de pesquisa desta ICT concentravam-se no desenvolvimento da FDC para fabricação de compostos cerâmicos na área da eletrônica, produzindo peças para sensores piezoelétricos, transdutores e atuadores. Apesar destes tópicos serem de interesse da indústria de materiais, houve uma

diminuição na produção destes equipamentos pela técnica de MA, o que ocasionou um desinteresse relativo nas pesquisas científicas no tema.

Com isso, apesar do pioneirismo da Universidade de Rutgers no cenário norte-americano de processamento por FDM, houve uma queda considerável no número de pesquisas científicas desta instituição, sendo sua última publicação ocorrendo em 2008. Apesar deste ocorrido, o cenário dos EUA continuou em crescimento, principalmente pelo fato de que no último quinquênio, os trabalhos realizados na Universidade Estadual da Pensilvânia em colaboração com a Universidade de Pádua na Itália terem se destacado. Estas instituições estavam se empenhando em produzir *scaffolds* cerâmicos para enxertia óssea por diferentes abordagens do processamento por FDM. As principais pesquisas estudam a reologia de polímeros para avaliar a resposta do extrudado, enquanto outros autores estavam preocupados em dominar o processo produtivo de peças pelos pós cerâmicos.

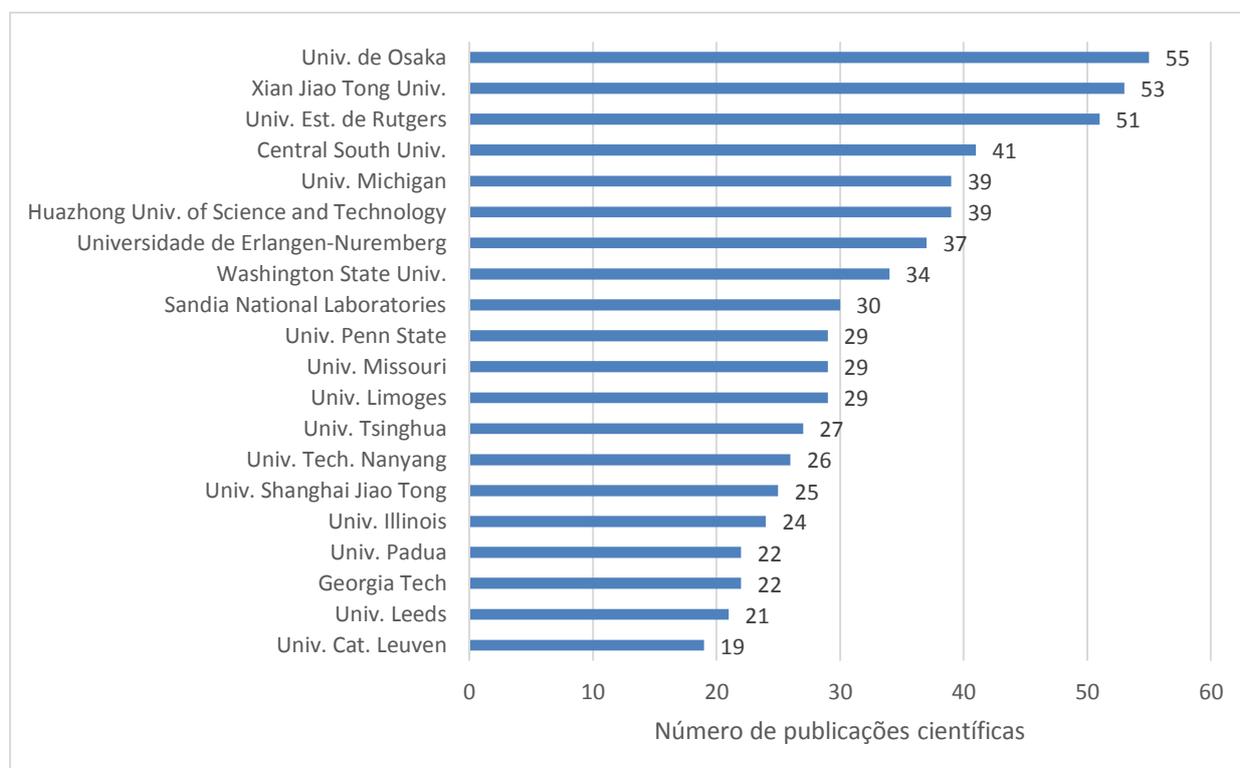
Outro motivo pelo qual o cenário norte-americano é distinto perante os outros principais países decorre do fato de que a segunda MA em destaque, com o focarem seus esforços no desenvolvimento de empresas e instituições de ensino lideradas pela Universidade do Michigan, é técnica de polimerização em cubas. Isto levou a evolução da técnica e popularização comercial do processo em parcerias com outras ICTs da Ásia. A Figura 4.5 mostra a evolução das três principais técnicas de MA referentes às pesquisas dos EUA.



Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor.

Figura 4.5 - Evolução das pesquisas norte-americanas nos três principais processos de MA no período de 1994 a 2018 pro quinquênio.

A análise mundial das pesquisas científicas permite analisar a perspectiva das principais ICTs que tem em sua agenda, investigar as biocerâmicas utilizadas na MA. O ranking das 20 principais destas que lideram a produção científica neste tópico, inclui organizações japonesas, chinesas, alemãs e norte-americanas, e está apresentada na Figura 4.6



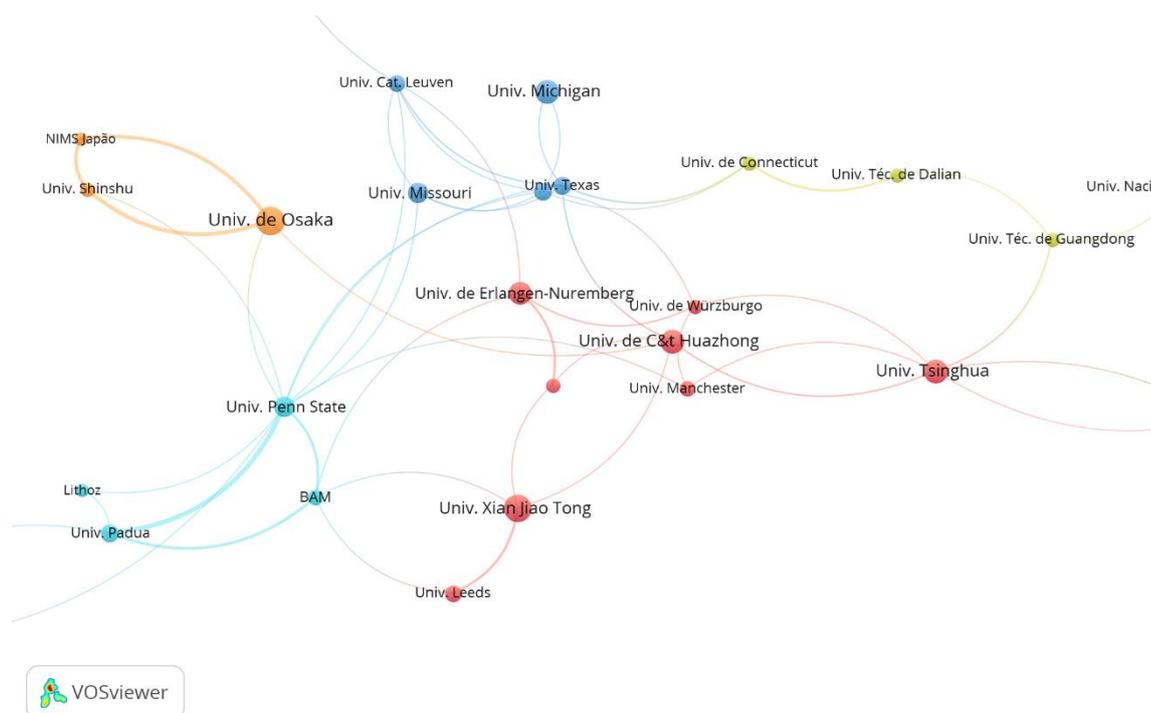
Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor.

Figura 4.6 - Principais Instituições de Ciência e Tecnologia mundiais que possuem publicações científicas em cerâmicas/biocerâmicas e manufatura aditiva.

Apesar do crescente número de publicações nos últimos 25 anos (1994-2018) mostrado no início deste tópico de análise, não houve uma instituição que se destacou ao nível de ser considerada referência no cenário mundial. Esta asserção pode ser explicada pelo estado emergente das pesquisas no assunto, tornando a análise pontual em diversas universidades ou centros de pesquisa que tem interesses em algum processo específico ou aplicação em um material.

Para compreender melhor a dinâmica das pesquisas entre as cinquenta principais instituições pesquisadoras no assunto, a parte central da rede de cocorrência de pesquisas está apresentada na Figura 4.7, sendo que a rede

completa está na Figura C.2 do Apêndice C. A rede mostra que as instituições de pesquisa não formam uma rede coesa por falta de ligação (publicações entre diferentes ICTs), sendo que apenas algumas universidades foram representadas. Quatro principais agrupamentos distintos são observáveis pela coloração dos nós, sendo que dois possuem destaque: um para as universidades asiáticas (em vermelho) e outra para as universidades norte-americanas e europeias (em azul), no entanto a ausência de intensidade de ligação pode estar associada às técnicas de MA que cada instituição tem pesquisado.



Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor no software VOSviewer

Figura 4.7 – Parte central da rede de colaboração entre as 50 principais instituições mundiais pesquisadoras no tema de biocerâmicas aplicadas por manufatura aditiva, com a Univ. de Osaka tendo 14,12% do total de força de ligação da rede.

Nos agrupamentos asiáticos (em vermelho e laranja), temos uma tendência na pesquisa pelo processamento por meio de Polimerização de Cubas. Por outro lado o *cluster* americano e europeu, liderados pelas pesquisas da Universidade Estadual da Pensilvânia, pesquisam processamento de pós cerâmicos ou combinações de cerâmicas com metais.

Mesmo com o Japão sendo o sétimo país no contexto mundial, a Universidade de Osaka é a ICT com maior número de publicações científicas em

biocerâmicas e MA com 56,12% de todas as publicações do seu país, tornando-se expoente no panorama asiático e mundial. Seu papel relativamente central na rede de colaboração, em laranja na Figura 4.7, mostra sua pouca interação com o cenário apesar do tamanho do seu nó. Assim, apesar de ser destaque no cenário mundial pelo número de pesquisas científicas esta universidade colaborou com outros países apenas 4 das suas 55 publicações (3 com a China e 1 com o EUA); Ou seja, 93% da sua produção científica envolve apenas pesquisadores próprios, isto pode ser um indicador de que a Universidade de Osaka procura ser expoente nesta perspectiva. Entretanto, esta observação nos faz avaliar que o estado da arte desta técnica ainda é emergente, e as colaborações entre os institutos de pesquisa foi baixo.

A principal linha de pesquisa da Universidade de Osaka refere-se ao processo de Polimerização de Cubas (81,82%). Entretanto, diferentemente do interesse desta pesquisa, as principais aplicações que estão sendo utilizadas a manufatura aditiva dizem respeito à produção de cristais fotônicos. Estes arranjos cristalinos de átomos que, por meio da engenharia da sua banda de valência e condução, faz com que o material tenha a propriedade de absorver ou emitir fótons de forma mais eficiente [97]. Os cristais fotônicos tem aplicações na indústria eletrônica e em soluções de eletromagnetismo aplicado. Na mesma instituição, para as pesquisas que citam materiais diferentes de cristais fotônicos, a alumina foi destaque com o intuito de criação de coroas dentárias, porém, estes artigos representam uma pequena parcela dentro da perspectiva da instituição.

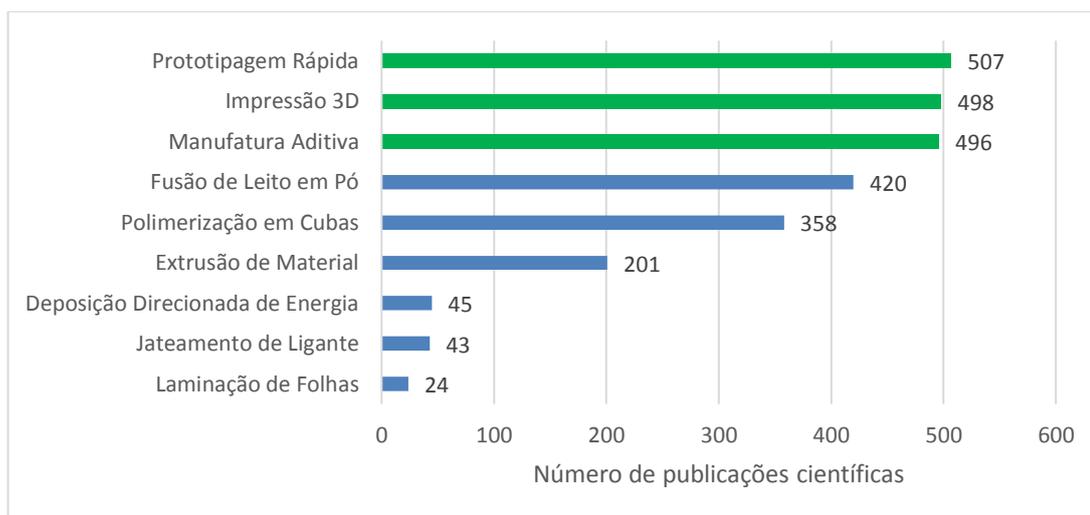
4.2 Evolução das pesquisas científicas em manufatura aditiva de biocerâmicas

4.2.1 Análise pela perspectiva das manufaturas aditivas

A Figura 4.8 mostra o número de publicações científicas por processo de MA, sendo que as barras em verde representando os processos de MA com

terminologia geral (e.g. Prototipagem Rápida e Impressão 3D) e as barras em azul, os processos definidos pela norma.

Por serem considerados termos gerais e terem sido utilizados no início das pesquisas quando não havia consenso na definição dos processos, esses termos foram os mais citados nas publicações científicas recuperadas. Esta característica pode ser interpretada também como uma tendência da falta de maturidade tecnológica da comunidade científica e industrial para com o processo, o descrevendo em termos mais “simples”. Dos processos específicos, houveram dois destaques, sendo estes (i) para a fusão de leito em pó, que mesmo tendo sido desenvolvida depois que outros processos, possui maior número de publicações científicas; e (ii) para a técnica de Jateamento de Ligantes que não obteve recuperação de processo, apenas de materiais utilizados no processamento (*binders*). Com isso, houve uma tendência de agrupar este processamento com o jateamento de material, apesar de serem técnicas diferentes, analisando ambos processos sobre a denominação de “Jateamento de Material”.

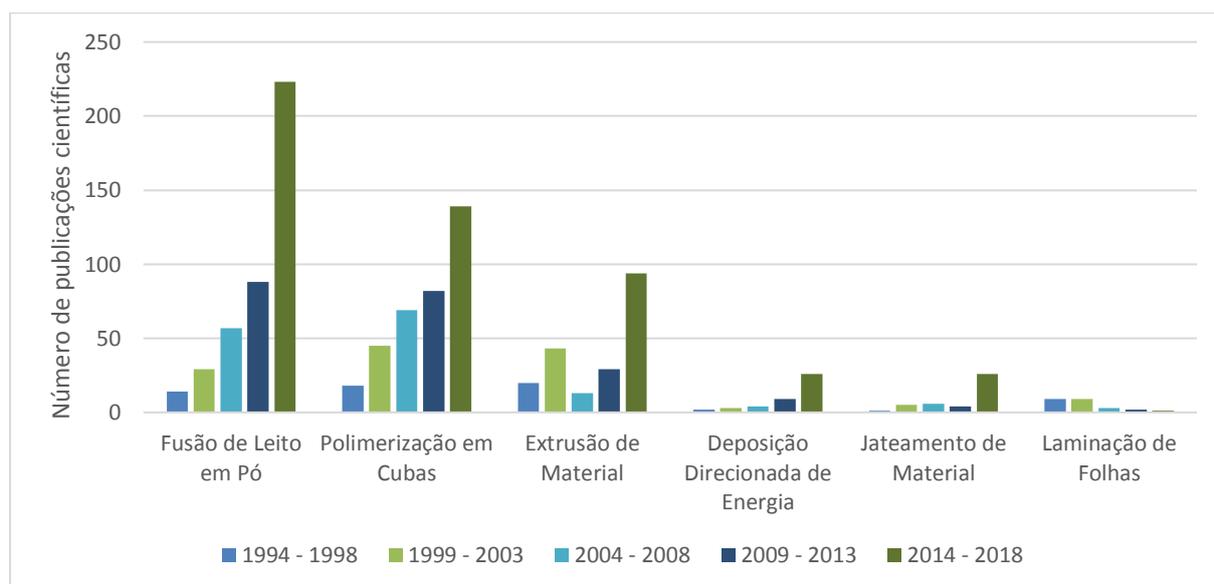


Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor.

Figura 4.8 - Publicações científicas mundiais distribuídas por processo de manufatura aditiva definidos em norma, destaque em verde para os que possuem termos gerais e os em azul, como processo específico.

A evolução temporal dos processos é apresentada na Figura 4.9, em que, aparentemente, três processos estão sendo pesquisados e consolidados,

corroborando com Lezema *et al.* [87]. Os processamentos por deposição direcionada de energia e laminação de folhas, limitados da própria característica da técnica, possuem pouca influência no processamento de cerâmicas, além deste tópico de pesquisa ser considerado uma tecnologia emergente. A análise temporal, o último quinquênio foi o que mais houve pesquisas no tópico de MA e biocerâmicas em praticamente todos as classes de processamento, o que pode ser entendido como um tópico emergente nas instituições e países mundiais.



Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor.

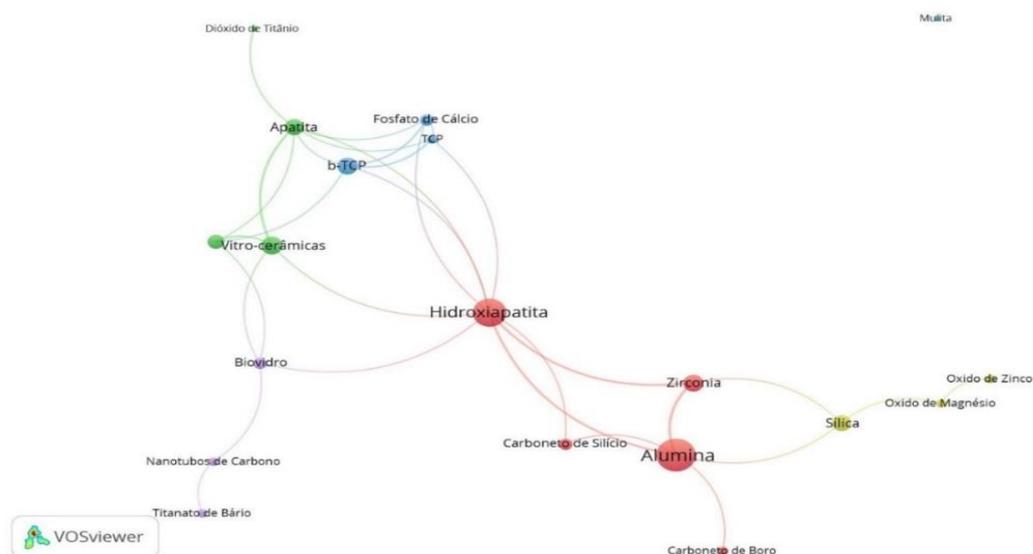
Figura 4.9 - Evolução temporal das publicações científicas de pesquisas dos processos de manufatura aditivas específicos e biocerâmicas em quinquênios no período entre 1994-2018.

A PBF representa 38,5% do total de publicações científicas do conjunto de processos de MA que são utilizados para aplicação de biocerâmicas, possuindo papel central de destaque no cenário mundial, o que pode ser verificado, de forma complementar, no Apêndice C. Destas 420 publicações científicas, a China se destaca com 25,23% dos artigos publicados, pois as principais instituições que sustentam esses números são a Universidade do Sul Central localizada em Changsha e a Universidade de C&T de Huazhong, em Guanshan, que, juntas, contribuíram com quase metade das publicações chinesas (48,11%).

Apesar da terminologia, dois principais processos descritos no referencial teórico de Fusão de Leito em Pó se sobressaíram perante aos outros. São eles a Sinterização Seletiva a Laser (SLS, do inglês) e a Fusão Seletiva a Laser (SLM, do inglês). No escopo de processos específicos de MA, a soma da contribuição da SLS com a de SLM descreve 83,52% dos processos de BPF e, apesar de se caracterizarem semelhantemente ao modo de operação, há uma grande divergência nas aplicações e materiais utilizados em ambas tecnologias.

Devido ao fato de fundir o pó de matéria-prima, as pesquisas científicas retratadas na SLM descreveram desenvolvimentos e análises de equipamentos mais potentes, capacidade e eficácia do laser em diferentes granulometrias de pós e, principalmente, aplicações mais voltadas para peças metálicas na indústria aeronáutica e automobilística. Das publicações que retratam as aplicações na área de ETO, grande parte focou em sistemas híbridos cerâmica/metals de coroas dentárias, apesar da falta de relevância no montante das pesquisas em SLM.

Por outro lado, as pesquisas de SLS retrataram satisfatoriamente o escopo desta pesquisa no que se refere a área de aplicação. As principais biocerâmicas para este processo estão apresentadas na Figura 4.10. Estando no centro da rede, a Hidroxiapatita/nano-Hidroxiapatita (25%) para aplicações em enxertos ósseos ou criação de próteses dentárias são as principais escolhas nesta MA. Uma característica interessante da SLS com as biocerâmicas se deu pelo fato de que a Inglaterra apresentou papel central na rede de colaboração entre os países por este processo (rede apresentada por completo no Apêndice C), principalmente pela contribuição das Universidades de Loughborough e Queen Mary.



Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor no software VOSviewer.

Figura 4.10 - Rede central das cerâmicas aplicas no processo de SLS, com a Hidroxiapatita tendo 30,23% da força de ligação da rede.

4.2.2 Análise pela perspectiva das biocerâmicas

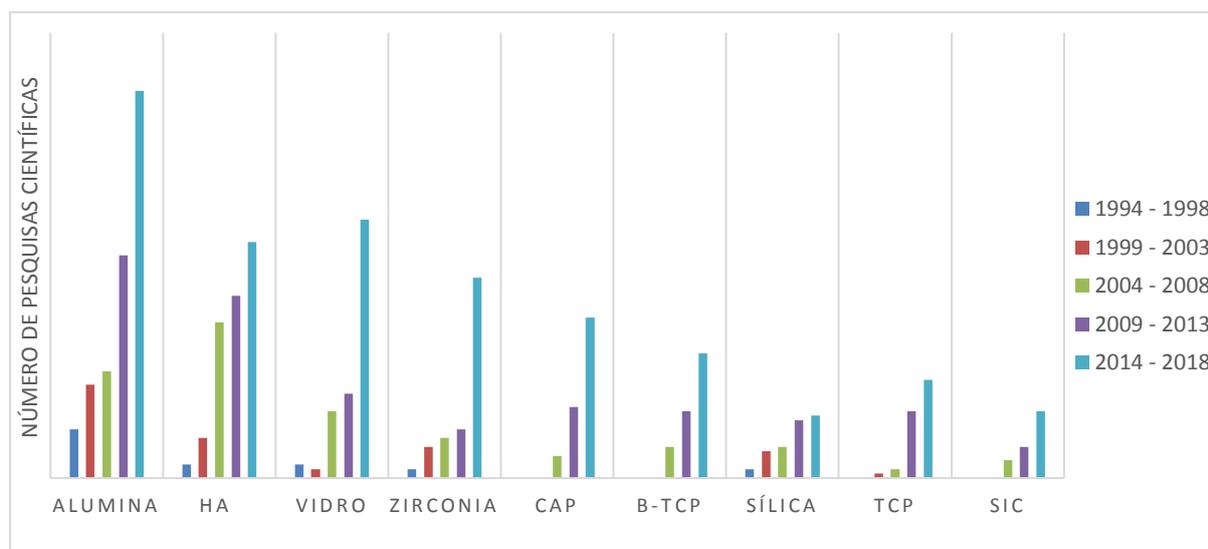
A Tabela 4.2 contém o material/composto cerâmico e o número total de publicações científicas mundiais indexadas na base de dados no período de 1994 a 2018. Também foi verificado se existe descrição da utilização na área de biomateriais, seja diretamente ou na produção de composições que estão sendo utilizadas em abordagens para biomateriais (tais como filmes, aditivos em vidros, entre outros).

Tabela 4.2 - Lista das cerâmicas extraídas por mineração de texto das publicações mundiais recuperadas na Web of Science, com destaque para as cerâmicas que não são utilizadas como biomaterial.

Material/Composição	Publicações	Biomaterial
Alginato	5	Sim
Alumina	199	Sim
α -Alumina	6	Sim
Apatita	14	Sim
Argila	6	Não
Biovidro	20	Sim
Carboneto de Boro	11	Sim
Carboneto de Silício	26	Sim
Carboneto de Silício Titânio	5	Sim
Carboneto de Titânio	9	Sim
Cimento de Fosfato de Cálcio	14	Sim
Concreto	7	Não
Diamante	6	Sim
Dióxido	5	Sim
Dióxido de Titânio	19	Sim
Fosfato de Cálcio	57	Sim
Grafeno	9	Sim
Hidroxiapatita	144	Sim
Monetite	5	Sim
Mulita	5	Sim
Nanotubos de Carbono	9	Sim
Nitreto de Silício	13	Sim
Oxido de Grafite	6	Sim
Oxido de Magnésio	7	Sim
Oxido de Zinco	8	Sim
Sílica	43	Sim
Sulfato de Cálcio Hidratado	6	Sim
TCP	40	Sim
β -TCP	51	Sim
Tintas Cerâmicas	16	Sim
Titanato de Bário	15	Sim
Titanato Zirconato de Chumbo	29	Não
Vidro	98	Sim
Vitrocerâmicas	17	Sim
Y-TZP	5	Sim
Zircônia	77	Sim

Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor.

Para as dez principais cerâmicas, foi verificada sua evolução temporal por quinquênio no período de 1994 a 2018, como mostrado na Figura 4.11. A alumina possui papel de destaque, pois em conjunto com a Hidroxiapatita tem sido intensamente pesquisada para aplicação via MA. O número de publicações científicas em fosfatos de cálcio (CaP, β -TCP e TCP) também apresenta uma tendência de crescimento nos últimos 15 anos.



Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor.

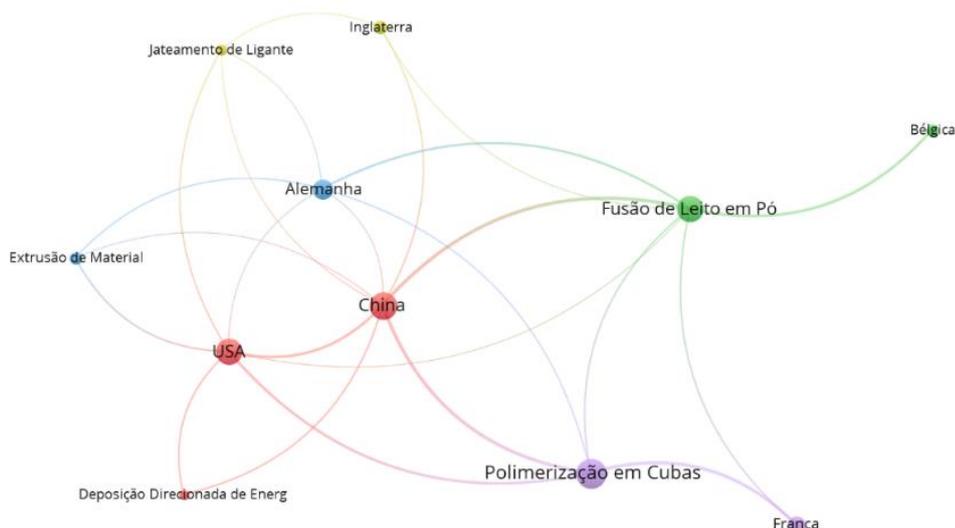
Figura 4.111 - Número de publicações científicas mundiais por quinquênio no período 1994- 2018 para as 10 principais biocerâmicas extraídas por mineração de texto.

A alumina foi a biocerâmica que obteve maior destaque no processo de mineração de texto dos artigos recuperados na base de dados para biocerâmicas aplicadas por MA, em complemento à análise dos países pesquisadores feita no item 4.1. Os processos de MA podem auxiliar neste cenário, pois de todas as pesquisas em alumina recuperadas por esta metodologia, 44,17% são em polimerização em cubas e 35% em fusão de leito em pó. Com isso, podemos dizer que estes dois processos são referência no processamento tridimensional deste material.

A polimerização em cubas possui um papel central no processamento de alumina, principalmente pelas pesquisas realizadas na China e França, sendo respectivamente, 22,81% e 21,05% a contribuição de cada país, como mostra a influência destas nações rede na Figura 4.12. Entretanto, nas análises das publicações científicas, a França obteve destaque, pois um terço de suas pesquisas são em alumina processada por polimerização em cubas. Esses números são possíveis pela contribuição da cidade francesa de Limoges, conhecida por “A capital francesa da porcelana” [98] ser um polo de pesquisa em cerâmicas na região. No cenário mundial, 63,15% dos estudos em alumina

foram associados a este processo, fazendo com que se torne referência na produção de peças com esta abordagem tecnológica.

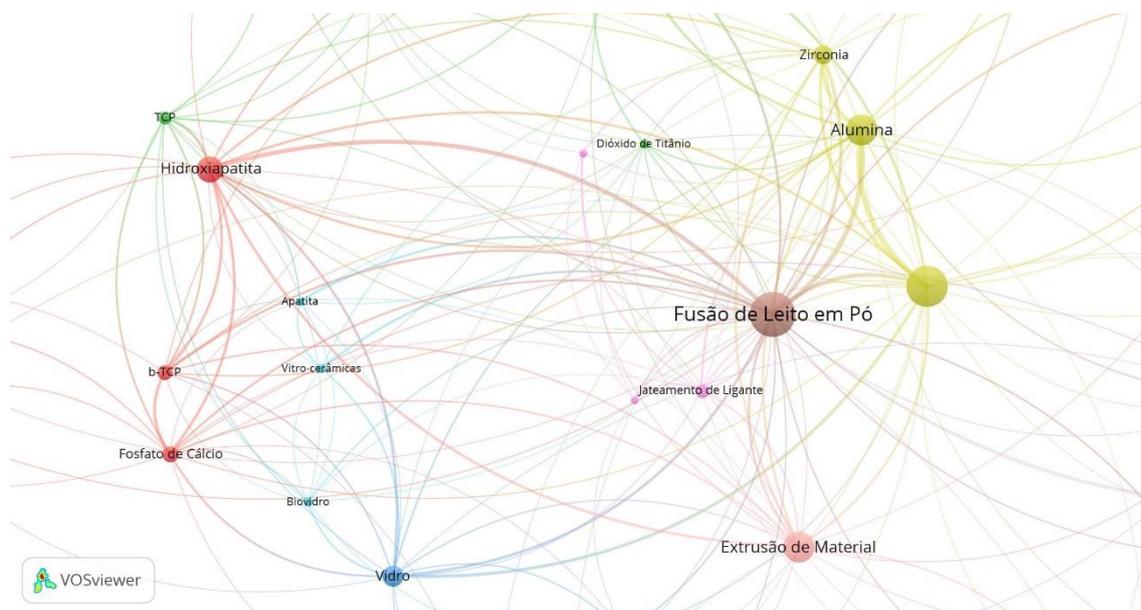
No que diz respeito ao processamento por PFB de alumina, a China (28,26%) e a Bélgica (19,57%) são os principais países de origem das instituições mais atuantes neste processamento. De fato, as pesquisas chinesas estão em sua grande maioria estudando o processamento desse material, sua microestrutura e propriedades mecânicas, tornando útil as informações contidas nestes artigos para compreensão dos parâmetros e opções de granulometria para empresas ou pesquisadores que já dominam a técnica. Assim como no país asiático, a Bélgica tem se preocupado em entender o processamento por PBF, principalmente estudando métodos indiretos e pesquisando sistemas híbridos para cerâmicas e metais. Na maioria dos casos, nenhuma abordagem foi diretamente na produção de *scaffolds* ou outras soluções para ETO, o que pode ser considerado uma oportunidade, visto que as pesquisas não vislumbraram esta aplicação.



Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor no software VOSviewer.

Figura 4.12 – Rede de colaboração entre os processos de MA e os 5 principais países pesquisadores em Alumina no escopo deste trabalho com a China tendo 46,15% da força de ligação na rede.

A Figura 4.13 mostra a união dos termos e expressões de MA e das biocerâmicas e entre os principais processos que se destacaram encontram-se a fusão de leito em pó e a extrusão de materiais. Quanto aos biomateriais, como mostrado nos indicadores de biocerâmicas, no que diz respeito a enxertia óssea, destacaram-se aqueles tidos como tradicionais pela área da saúde. Os materiais que se mostraram com maior ligação foram a zircônia, vidro e HA, porém há de se notar a presença de outros materiais cerâmicos como sílica, dióxido de titânio e carboneto de silício. Estes três últimos materiais foram utilizados em abordagens de aplicação de biocerâmicas técnicas para auxiliar os enxertos na profilaxia do sítio de enxertia, por exemplo.

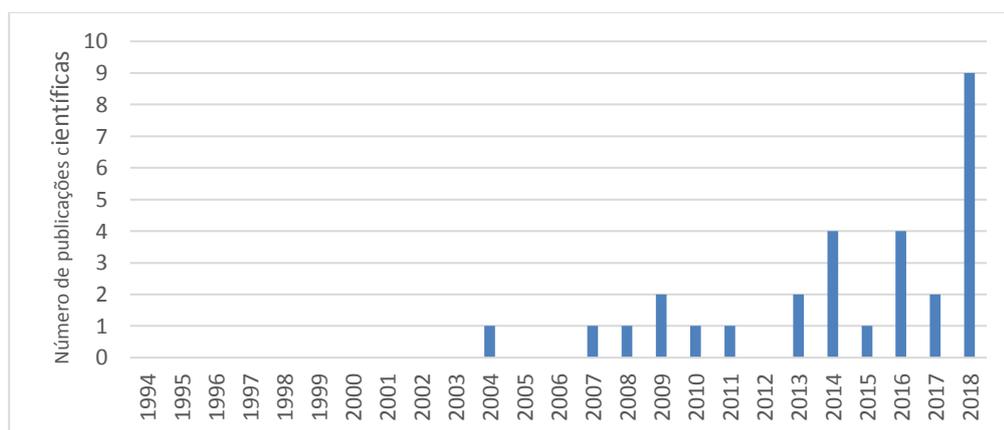


Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor no software VOSviewer.

Figura 4.12 - Parte central da rede de colaboração mundial entre os processos de MA com as biocerâmicas extraídas por mineração de texto, sendo a fusão de leito em pó com 29,50% da força de ligação na rede.

4.3 Panorama brasileiro das pesquisas científicas em manufatura aditiva de biocerâmicas

Neste período de análise, a contribuição brasileira perante o cenário mundial de pesquisa em MA é modesta, conforme é apresentado na Figura 4.14. No total, foram encontradas 30 publicações científicas indexadas na base de dados utilizada. O destaque foi para o ano de 2018 pelo maior número de publicações ocorridos, o que sugere um engajamento, mesmo que tardio, dos pesquisadores brasileiros. Em complemento a esta análise, dois terços da produção científica do país encontram-se no último quinquênio (2014-2018). Nos últimos 25 anos o Brasil contribuiu em 1,64% das publicações científicas em biocerâmicas utilizadas na MA, sendo que, pelos dados da Web of Science, a contribuição brasileira em biopolímeros, por exemplo, é de aproximadamente 5%⁴. Isto é, o tema ainda não possui relevância nos objetivos tecnológicos brasileiros, visto que um tema análogo (biopolímeros) possui quase três vezes mais pesquisas.

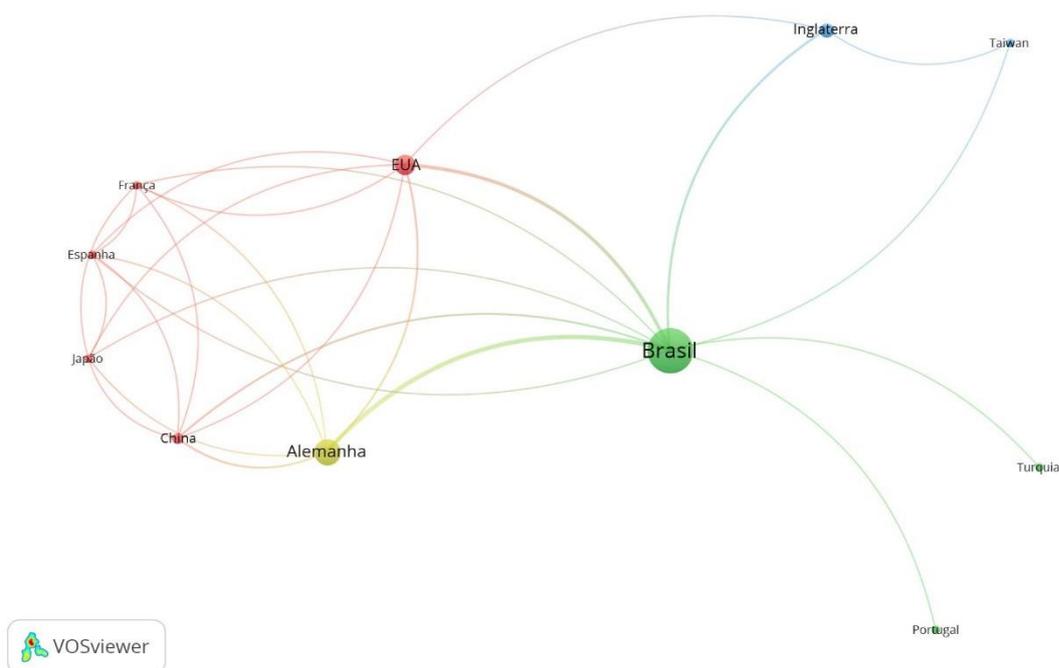


Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor.

Figura 4.14 - Número de publicações científicas brasileiras no período de 1994 a 2018 na Web of Science.

⁴ Estatística gerada pela base de dados Web of Science acessada pelo Portal de Periódicos da CAPES uma pesquisa realizada dia 08/04/2019 contendo a expressão de busca: (TS = "biomat* AND polymer*"). Com o auxílio do software de bibliografia próprio da base de dados, foi possível realizar filtragem dos países pesquisadores e, neste cenário, a contribuição brasileira foi de 5%.

Pela análise da rede de colaboração mostrada na Figura 4.15, o Brasil, ainda que de forma timidamente, possui parcerias decorrentes da produção científica com países importantes na área de biocerâmicas processadas por MA, como EUA e Alemanha. Uma possível rota para minimizar o ingresso recente dos brasileiros na pesquisa do tema e acelerar seu impacto é intensificar parcerias de pesquisa com instituições de tais países.



Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor no software VOSviewer

Figura 4.15 - Rede de colaboração em pesquisas científicas entre Brasil e os países que possuem pesquisas em biocerâmicas aplicadas por MA, com o Brasil tendo 58,7% da força de ligação da rede.

O ambiente das principais instituições brasileiras é apresentado na Tabela 4.3. Nela, é possível avaliar que existem 19 instituições de 10 estados brasileiros pesquisando biocerâmicas usadas na MA. Em complemento, é possível dizer que a pesquisa científica neste tópico é realizada em sua maioria em universidades públicas (77,14%).

Em complemento às informações contidas na Tabela 4.3, é possível analisar o perfil da ICT no que diz respeito à sua constituição organizacional e, ajudando a compreender o cenário brasileiro de pesquisas científicas em

biocerâmicas e MA. Das ICTs recuperadas pelo procedimento metodológico, 27 são universidades públicas brasileiras (77,14%), enquanto 6 são universidades particulares (17,14%) e 5,71% de outros tipos de instituições.

Tabela 4.3 - Característica e número de publicações das Instituições Brasileiras.

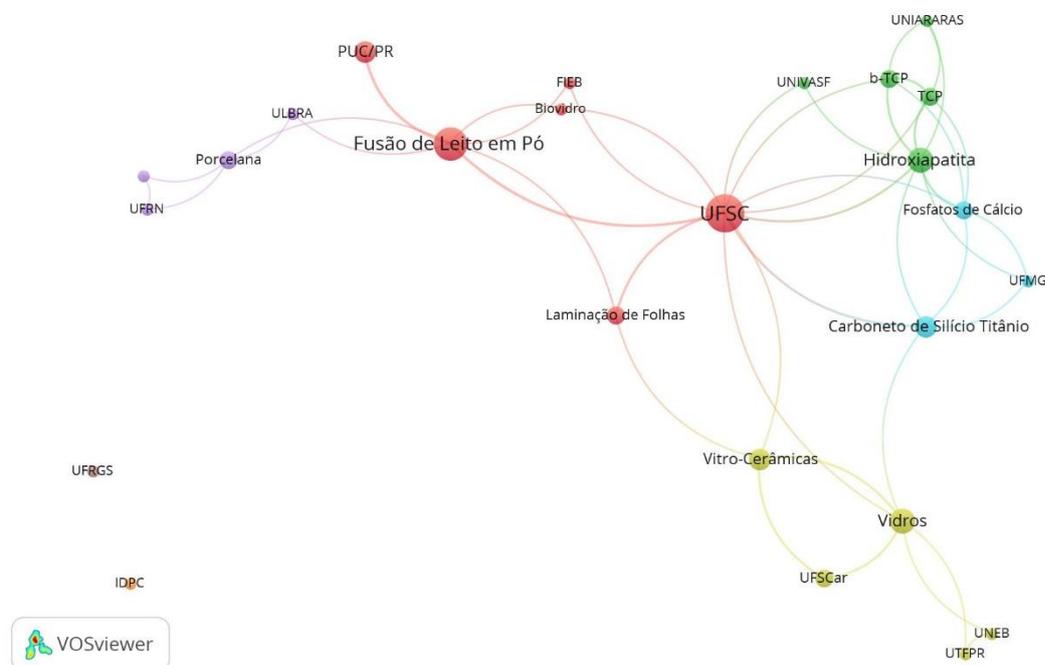
Instituições Brasileiras	Publicações	Estado	Classe de Instituição
UFSC	9	SC	Universidade Pública
USP	6	SP	Universidade Pública
PUC/PR	3	PR	Universidade Privada
UFSCar	2	SP	Universidade Pública
Dante Pazzanese Instituto de Cardiologia	1	SP	Instituto de Pesquisa
FIEB	1	BA	Instituto de Ensino Tec.
UFBA	1	BA	Universidade Pública
UFG	1	GO	Universidade Pública
UFMG	1	MG	Universidade Pública
UFRGS	1	RS	Universidade Pública
UFRN	1	RN	Universidade Pública
UFSE	1	SE	Universidade Pública
ULBRA	1	RS	Universidade Privada
UNEB	1	BA	Universidade Pública
UNESP	1	SP	Universidade Pública
UNIARARAS	1	SP	Universidade Privada
UNICAMP	1	SP	Universidade Pública
UNIVASF	1	BA	Universidade Privada
UTFPR	1	PR	Universidade Pública

Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor desta pesquisa

A região Sul e Sudeste estão em destaque na perspectiva das publicações científicas brasileiras com, em conjunto, mais de 80% de participação nos estudos. Nessa região encontra-se a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), que possui o maior número de publicações científicas, representando 25% do total do país. Com isso, além de proporcionalmente ter maior tamanho de nó na Figura 4.16, também tem papel central na rede de colaborações brasileira. A Figura 4.16 mostra ainda o relacionamento das instituições com a biocerâmica e o processo de MA. Verifica-se que a Fusão de Leito em Pó com biovidro e porcelana, no caso do agrupamento em vermelho que envolve a UFSC; enquanto que o agrupamento em amarelo, com a UFSCar, relaciona-se com vidros em geral e vitro-cerâmicas.

Destacam-se também nessa listagem a presença de universidades privadas, como a Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC/PR) como sendo a terceira maior pesquisadora na área, e também institutos de pesquisa clínica, como o Dante Pazzanese de Cardiologia (SP). Essas redes referentes

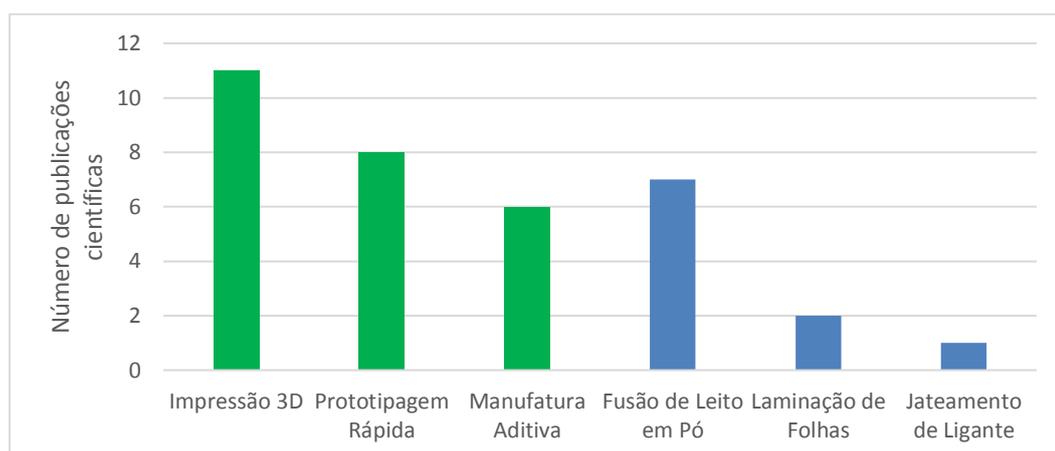
aos materiais e processos que as instituições brasileiras pesquisam podem ser vistas em maiores detalhes no Apêndice C.



Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor no software VOSviewer.

Figura 4.16 - Mapeamento dos processos de MA em conjunto com as principais biocerâmicas pesquisadas pelas instituições brasileiras extraídas por mineração de texto, com a UFSC tendo 26,56% da força de ligação da rede.

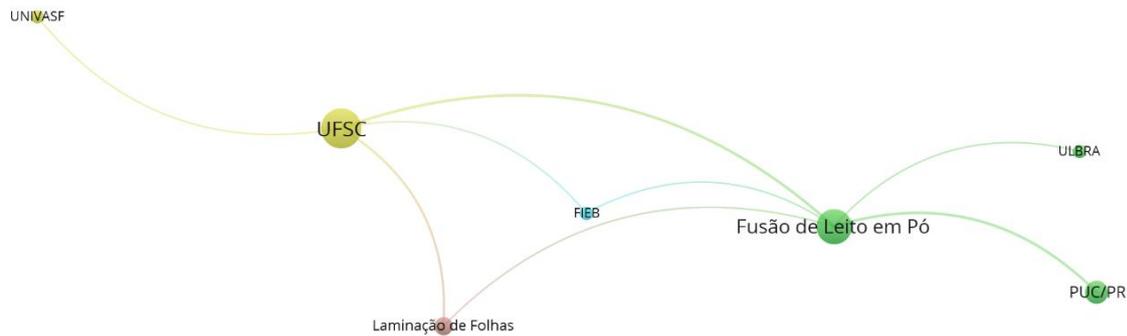
A mineração de texto das publicações científicas brasileiras em relação aos processos de manufatura aditiva em biocerâmicas mostrou coerência com o cenário mundial, conforme Figura 4.17. Inicialmente é possível visualizar os termos referentes aos processos com terminologia geral tem maior ocorrência nos dados brasileiros. Enquanto que a técnica específica que mais obteve publicações científicas foi a de fusão de leito em pó. Portanto, apesar das devidas proporções, o Brasil, nesta comparação, está procurando seguir o cenário mundial.



Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor.

Figura 4.17 - Publicações científicas brasileiras por processo de manufatura aditiva, em verde os processamentos com termos gerais e em azul os específicos definidos em norma.

Das instituições que pesquisam biocerâmicas e os processos de MA no Brasil, podem ser analisadas pelas principais colaborações entre si, como mostra a Figura C.15 no Apêndice C. Parte central desta está sendo exibida na Figura 4.18, em que há a UFSC se relacionando com o processo de Fusão de Leito em Pó e Laminação de Folhas, corroborando com os números apresentados no gráfico da Figura 4.17. É importante salientar que esta rede de colaboração entra as ICTs brasileira e os processos extraídos por mineração de texto, apresenta uma das possíveis limitações da metodologia escolhida, visto que há a possibilidade destas e outras instituições terem pesquisas nos processos de MA, entretanto, pelo processo desta pesquisa, pode não ter sido recuperado.



Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor no software VOSviewer

Figura 4.13 – Parte central da rede de colaboração de pesquisa científica entre as instituições de pesquisa brasileiras e os processos de MA, com a UFSC tendo 38,89% de força de ligação na rede.

As pesquisas brasileiras também foram analisadas analogamente ao processo de extração de informação das publicações científicas mundiais referente aos materiais. Sendo assim, após o processo manual de análise das entradas de expressões substantivadas do campo de mineração de texto referente às publicações científicas brasileiras, se obteve uma lista com 21 materiais ou composições cerâmicas, estas descritas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Lista das cerâmicas extraídas por mineração de texto das publicações brasileiras recuperadas na Web of Science, com destaque para as cerâmicas que não são utilizadas como biomaterial.

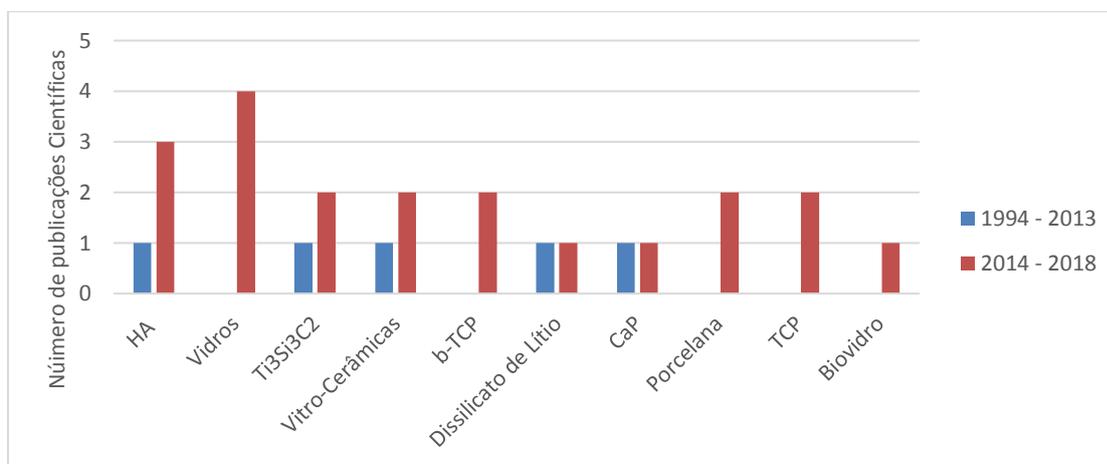
Materiais/Compostos	Registro	Biomaterial
BGO	1	Não
Bioglass	1	Sim
b-TCP	2	Sim
Carboneto de Silício de Titânio	3	Sim
Carboneto de Titânio	1	Sim
Diboreto de Zircônia	2	Não
Dióxido de Silício	1	Sim
Dissilicato de Lítio	2	Sim
Fosfatos de Cálcio	2	Sim
Grafeno	1	Sim
Hidroxiapatita	4	Sim
Metasilicato de Lítio	1	Sim
Porcelana	2	Sim
Sílica	1	Sim
Sulfato de Cálcio Hidratado	1	Sim
TCP	2	Sim
Titanato Zirconato de Chumbo	1	Sim
Vidros	4	Sim
Vitrocerâmicas	3	Sim
Y-TZP	1	Sim
Zircônia	1	Sim

Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor.

Nela, foi possível observar a relevância das pesquisas mundiais e brasileiras em composições de fosfatos de cálcio (e.g. Hidroxiapatita e TCP) assim como da alumina e zircônia, como mostra a Figura 4.19. O número de publicações acumuladas em 20 anos (período 1994 – 2013) foi, para as dez principais cerâmicas encontradas nas publicações brasileiras, igual ou menor do que a análise no último quinquênio (2014 a 2018). A hidroxiapatita, cerâmica com maior ocorrência na lista, esteve presente como assunto em 75% das pesquisas neste período, enquanto no mesmo período, ocorreram todas as publicações científicas dos vidros. Esta constatação mostra que o Brasil, ainda que incipiente na pesquisa científica de biocerâmicas para aplicação na MA, tem se interessado no assunto.

Uma finalidade da mineração de texto é a obtenção de materiais que são *insights* para aplicações que não se tinha interesse inicialmente. Assim ocorreu com o vidro, biovidro ou vitrocerâmicas. Estes são materiais comuns em aplicações odontológicas que não necessariamente são de enxertia óssea. Entretanto, apesar da dificuldade do processamento, esses materiais foram

bastante recorrentes nas listagens mundiais e do Brasil, como mostram as Tabelas 4.2 e 4.4.



Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor.

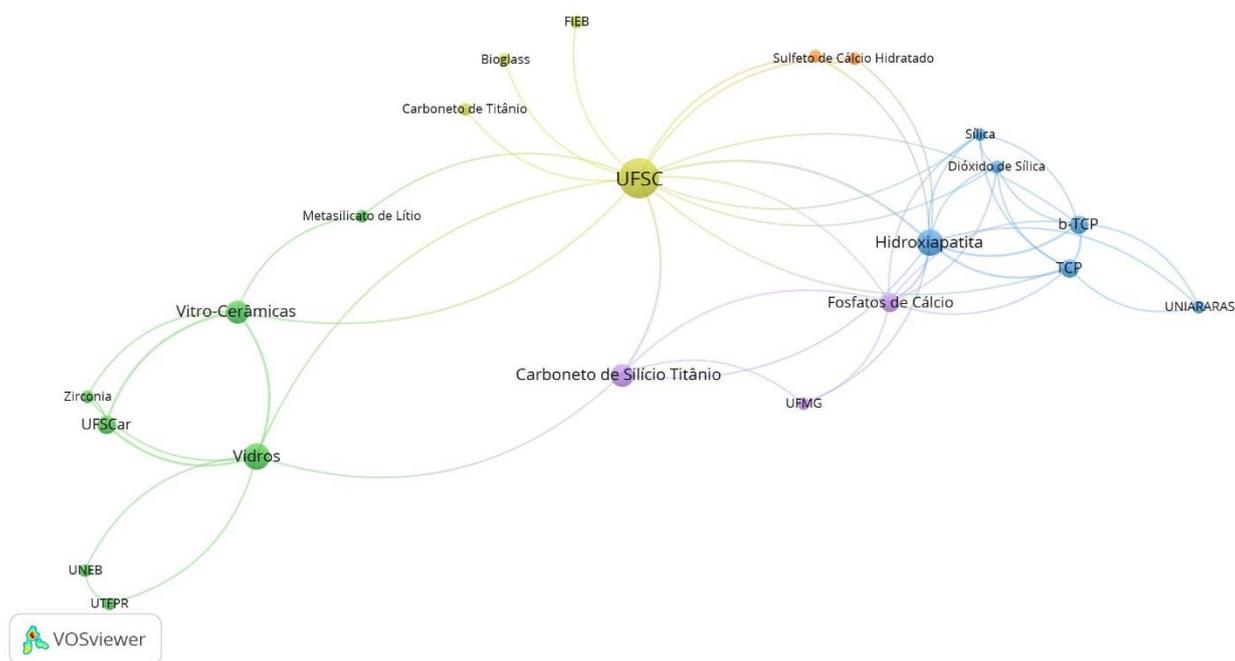
Figura 4.19 - Número de publicações científicas brasileiras pelo acumulado nos quatro primeiros quinquênios (1994 – 2013) e no último quinquênio (2014 – 2018) para as 10 principais biocerâmicas extraídas por mineração de texto.

Nesta perspectiva das publicações brasileiras, é possível observar que há especificidades que não são observadas no panorama mundial referente às biocerâmicas aplicadas por MA. Dos quase 20 materiais cerâmicos extraídos por mineração de texto, destacam-se o carboneto de silício titânio ($Ti_3Si_3C_2$) e o dissilicato de lítio ($Li_2Si_2O_5$) neste ponto. Apesar deste último material não ser diretamente citados em abordagens pelos engenheiros de materiais, ele é muito utilizado por dentistas para construção de coroas dentárias. Por outro lado, o carboneto de silício titânio apresentou uma perspectiva de início de estudos, fazendo com que seja considerada um potencial material cerâmico a ser aplicada nos processos de manufatura aditiva.

Em complemento, apesar de ser a biocerâmica com maior ocorrência nos artigos científicos mundiais, a alumina não apresentou nenhuma correspondência na recuperação da informação das publicações brasileiras. A comunidade científica brasileira, aparentemente, estuda biocerâmicas para aplicações em engenharia de tecidos ósseos e, quando optou por utilizar algum processamento de manufatura aditiva, têm utilizado biocerâmicas tradicionais

como os fosfatos de cálcio (na sua maioria Hidroxiapatita e TCP) e vidros/vitrocerâmicas. Esta asserção pode ser explicada pelas linhas de pesquisa que o Brasil possui com a Alemanha (Figura 4.6), seu principal país com coocorrência de pesquisas científicas, tendo a UFSC sua principal instituição pesquisadora.

Assim como a análise feita para as instituições brasileiras e os processos de MA, a Figura 4.20 apresenta a rede das principais ICTs no Brasil e as biocerâmicas. Apesar da posição central da UFSC, como instituição proeminente, uma maior densidade de colaboração ocorreu entre as cerâmicas de CaP (agrupamento azul). Em complemento, assim como na outra análise, a UFSCar continua no agrupamento dos materiais vítreos (agrupamento em verde).

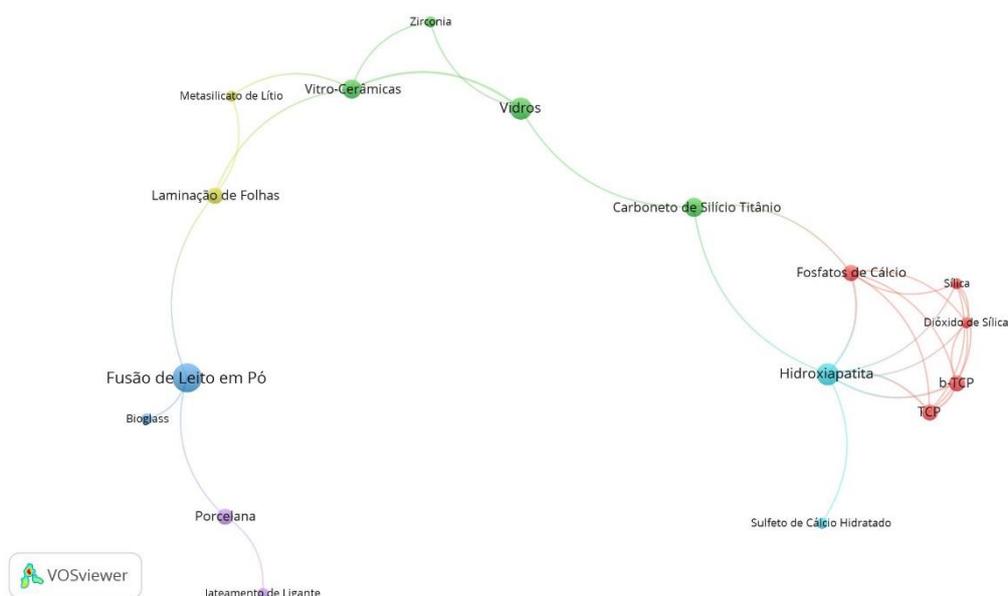


Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor no software VOSviewer

Figura 4.20 – Rede de coocorrência entre as principais biocerâmicas pesquisadas pelas instituições brasileiras, sendo a UFSC central com 29,26% da força de ligação na rede.

Para a mesma análise das publicações científicas em biocerâmicas e processos de MA brasileiros, foi criada a rede de coocorrência de publicações científicas, que está mostrada na parte principal na Figura 4.21. Devido à

quantidade de processos de MA específicos extraídos dos dados brasileiros, nesta abordagem foram mantidos os termos gerais, para melhor análise da rede. Com isso, houve uma polarização maior para estes processos, com a presença destacada para a fusão de leito em pó. Diferentemente da rede mundial, os principais materiais estavam descritos dos termos gerais e houve um agrupamento dos principais fosfatos de cálcio mostrado em verde, enquanto um *cluster* de vidros, vitrocerâmicas e zircônia estavam descritos em mais de uma técnica de MA.



Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor no software VOSviewer.

Figura 4.14 - Parte central da rede de colaboração brasileira entre os processos de MA e as biocerâmicas mapeadas por mineração de texto, com a Hidroxiapatita tendo 28,57% da força de ligação na rede.

5 CONCLUSÕES

Após feita a apresentação dos indicadores em conjunto com uma descrição e a discussão dos principais resultados presentes no escopo de dados recuperados nesta dissertação, é possível concluir que:

- O cenário mundial de pesquisas em biocerâmicas aplicadas por MA está em uma fase crescente, com uma tendência de polarização de publicações pelos EUA, China e Alemanha e outros países europeus;
- Em complemento, o cenário mundial ainda é difuso e não possui instituições de pesquisa que sejam referência no assunto de MA de biocerâmicas, o que pode ser visto pela falta de coesão na rede das 50 principais instituições mundiais;
- A discussão referente aos termos de manufatura aditiva ainda é extensa mesmo após a redação de uma norma para referência técnica. Essa falta de padrão, comum para tecnologias em crescimento ou não maduras, interfere diretamente na recuperação de informação e podem tornar desafiadoras futuras pesquisas no tópico;
- Os processos existentes de manufatura aditiva estão mais concentrados nos comercialmente conhecidos, tais como Impressão 3D e Prototipagem Rápida. Isto deve-se devido à recente criação de norma para padronização da terminologia, além de tratar da técnica com um todo para delimitação de campo de estudo;
- Dos processos especificados em norma, os principais destaques são para a Polimerização em Cubas, devido ao fato de ter sido pioneira nas descrições de MA, e para a Fusão de Leito em Pó como técnica com maior interesse de pesquisa pela metodologia adotada. Em adendo, apesar de descritas como processos separados, houve uma dificuldade na seleção do Jateamento de Ligante e Jateamento de Material para se analisar separadamente, levando a uma falta de perspectiva completa de todos os processos de MA descritos na ASTM 52.900;

- As biocerâmicas mais comumente utilizadas na área de saúde obtiveram maior ocorrência nessa análise. O destaque se deu pelo alto número de pesquisas mostrando a aplicação de vidros, vitrocerâmicas ou biovidro, apesar da complexidade de produção. Algumas biocerâmicas pouco utilizadas ou descritas nas referências de biomateriais para saúde foram recuperadas, e sua utilização na produção de *scaffolds* poderá ser feita mediante estudos complementares;
- Apesar de ter um número crescente de pesquisas no tópico, o Brasil encontra-se aquém no cenário mundial. As publicações não estão apresentando ocorrência estável ao longo do tempo, o que pode indicar a ausência ou a incipiência de grupos de pesquisa nos estudos voltados para o tema no país. Com isso, é possível dizer que os processos de MA não estão na agenda de interesse de pesquisa brasileira. Além disso, em se tratando de biocerâmicas, não há convergência em materiais que possam mudar esta perspectiva, fazendo com que o Brasil ainda esteja em estágios de compreensão da técnica.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Por meio das análises realizadas por esta dissertação, tendo em consideração as restrições metodológicas inerentes aos estudos científicos, as sugestões para trabalhos futuros nos temas de prospecção de informação para manufatura aditiva de biocerâmicas são:

- Aperfeiçoamento ou modificação do método bibliométrico com ênfase na análise em outra base de dados científicas de interesse da pesquisa, tal como a PubMed. Com essas informações recuperadas, avaliar e comparar com os indicadores da Web of Science. Esta perspectiva, poderá ter uma visão mais completa do assunto no que diz respeito à cobertura das publicações em aplicações diretas pela área da saúde. Outra opção, ainda nos métodos bibliométricos de análise, é que é possível procurar informações técnicas oriundas de patentes, apesar que essa avaliação possa ter um escopo menor de indexações visto as manufaturas científicas serem uma tecnologia relativamente nova;
- Tendo as informações relativas aos processos e biomateriais cerâmicos levantados nesta pesquisa, disseminar os resultados junto a agências de fomento e ou instituições de pesquisa que, potencialmente, possam se interessar no desenvolvimento de peças anatômicas por MA como um produto técnico de alto valor agregado;
- Detalhar os parâmetros de processos de MA ou de biocerâmicas nela utilizadas, através da consulta da produção científica mapeadas usando os indicadores previamente estabelecidas nesta pesquisa;
- Realizar estudos exploratórios do patenteamento em MA e prospectar potenciais biocerâmicas que atenderiam aos requisitos para o uso em ETO.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] LANZA, R. P.; LANGER, R.; VACANTI, J. **Principles of Tissue Engineering**. 2nd. ed. San Diego: Academic Press, 2000.

[2] BELL, E.. Part IV: Models for Tissue Engineering: Organotypic and Histiotypic Models of Engineered Tissues. In: LANZA, R. P.; LANGER, R.; VACANTI, J. **Principles of Tissue Engineering**. 2nd. ed. San Diego: Academic Press, 2000. Cap. 4. p. 505-506.

[3] PIRES, A. L. R.; BIERHALZ, A. C. K.; MORAES, A. M.. Biomaterials: Types, Applications, and Market. **Química Nova**, [São Paulo], v. 38, n. 7, p.957-971, abr. 2015. GN1 Genesis Network. <http://dx.doi.org/10.5935/0100-4042.20150094>.

[4] SOUZA, Marina Trevelin. **Desenvolvimento e caracterização de tecidos vítreos flexíveis altamente bioativos**. 2016. 218 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2016.

[5] WILLIAMS, D. F. **The Williams Dictionary of Biomaterials**. Liverpool: Liverpool University Press, 2012.

[6] GARD, S. Prosthetic Devices and Methods. In: AKAY, Metin (Ed.). **Wiley Encyclopedia of Biomedical Engineering**. 6nd. ed. Chicago: John Wiley & Sons, 2006. p. 2865-2884.

[7] CHEN, R. K. et al. Additive manufacturing of custom orthoses and prostheses—A review. **Additive Manufacturing**, [s.l.], v. 12, p.77-89, out. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2016.04.002>.

[8] HUTMACHER, D. W. et al. Scaffolds in tissue engineering bone and cartilage. **Biomaterials**, Guilford, v. 21, n. 24, p.2529-2543, dez. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0142-9612\(00\)00121-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0142-9612(00)00121-6).

[9] O'BRIEN, F. J.. Biomaterials & scaffolds for tissue engineering. **Materials Today**, Oxford, v. 14, n. 3, p.88-95, mar. 2011. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s1369-7021\(11\)70058-x](http://dx.doi.org/10.1016/s1369-7021(11)70058-x).

[10] HOLLISTER, S. J.. Porous scaffold design for tissue engineering. **Nature Materials**, London, v. 4, n. 7, p.518-524, jul. 2005. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1038/nmat1421>.

[11] SHRIVATS, A. R.; MCDERMOTT, M.C.; HOLLINGER, J. O.. Bone tissue engineering: state of the union. **Drug Discovery Today**, London, v. 19, n. 6, p.781-786, jun. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.drudis.2014.04.010>.

[12] BOSE, S.; VAHABZADEH, S.; BANDYOPADHYAY, A.. Bone tissue engineering using 3D printing. **Materials Today**, Oxford, v. 16, n. 12, p.496-504, dez. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mattod.2013.11.017>.

[13] MORDOR INTELLIGENCE. **Biomaterials Market: Growth, trends, and Forecast (2017-2022)**. Gachibowli: [s.l.], 2017. Disponível em: <<https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/global-biomaterials-market-industry>>. Acesso em: 26 fev. 2018.

[14] BURNY, F.; DONKERWOLCKE, M.; MUSTER, D.. Biomaterials education: a challenge for medicine and industry in the late 1990s. **Materials Science And Engineering: A**, [s.l.], v. 199, n. 1, p.53-59, ago. 1995. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0921-5093\(95\)09907-7](http://dx.doi.org/10.1016/0921-5093(95)09907-7).

[15] TURRER, C. L.; FERREIRA, F. P. M.. Biomateriais em cirurgia crânicomaxilofacial: princípios básicos e aplicações - revisão de literatura. **Revista Brasileira de Cirurgia Plástica**, São Paulo, v. 23, n. 3, p.234-239, 2008.

[16] UNITED STATES OF AMERICA. NATIONAL INSTITUTES OF HEALTH. **Clinical Applications of Biomaterials**. Maryland: [s.l.], 1982.

[17] RATNER, B. et al. **Biomaterials Science: An Introduction to Materials in Medicine**. 2nd. ed. London: Elsevier Academic Press, 2004.

[18] DEE, K. C.; PULEO, D. A.; BIZIOS, R.. **An Introduction To Tissue-Biomaterial Interactions**. 1st. ed. New Jersey: y John Wiley & Sons, Inc., 2002.

- [19] BRAGA, F. J. C.. **Materials Aplicados à Medicina e Odontologia: Físico-Química e Resposta Biológica**. 1 ed. São Paulo: Artliber, 2015.
- [20] HOLZAPFEL, B. M. et al. How smart do biomaterials need to be? A translational science and clinical point of view. **Advanced Drug Delivery Reviews**, Amsterdam, v. 65, n. 4, p.581-603, abr. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.addr.2012.07.009>.
- [21] KAWACHI, E. Y. et al. Biocerâmicas: tendências e perspectivas de uma área interdisciplinar. **Química Nova**, São Paulo, v. 23, n. 4, p.518-522, ago. 2000. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422000000400015>.
- [22] PARK, J. B. Tissue Response to Implants (Biocompatibility). **Biomaterials Science And Engineering**, Washington, p.171-192, 1984. Springer US. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4613-2769-1_7.
- [23] NAVARRO, M et al. Biomaterials in orthopaedics. **Journal Of The Royal Society Interface**, Biggleswade, v. 5, n. 27, p.1137-1158, 30 jul. 2008. The Royal Society. <http://dx.doi.org/10.1098/rsif.2008.0151>.
- [24] NIINOMI, Mitsuo. Recent research and development in titanium alloys for biomedical applications and healthcare goods. **Science And Technology Of Advanced Materials**, [s.l.], v. 4, n. 5, p.445-454, jan. 2003. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1016/j.stam.2003.09.002>.
- [25] GEETHA, M. et al. Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants – A review. **Progress In Materials Science**, [s.l.], v. 54, n. 3, p.397-425, maio 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.06.004>.
- [26] MCGREGOR, D.B. et al. Evaluation of the carcinogenic risks to humans associated with surgical implants and other foreign bodies — a report of an IARC Monographs Programme Meeting. **European Journal Of Cancer**, Oxford, v. 36, n. 3, p.307-313, fev. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0959-8049\(99\)00312-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0959-8049(99)00312-3).
- [27] TEOH, S. Fatigue of biomaterials: a review. **International Journal Of Fatigue**, Oxford, v. 22, n. 10, p.825-837, nov. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0142-1123\(00\)00052-9](http://dx.doi.org/10.1016/s0142-1123(00)00052-9).

[28] WAPNER, K. L. Implications of metallic corrosion in total knee arthroplasty. **Clinical Orthopaedics And Related Research**, Philadelphia, v. 271, p.12-20, out. 1991.

[29] MARKETS AND MARKETS. **Biomaterials Market by Type of Materials (Metallic, Ceramic, Polymers, Natural) & By Application (Cardiovascular, Orthopedic, Dental, Plastic Surgery, Wound Healing, Neurological disorders, Tissue Engineering, Ophthalmology): Global Forecast to 2024**. Northbrook: [s.l.], 2017. Disponível em: <<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/biomaterials-393.html>>. Acesso em: 20 fev. 2018.

[30] VERT, M.. Polymeric biomaterials: Strategies of the past vs. strategies of the future. **Progress In Polymer Science**, Oxford, v. 32, n. 8-9, p.755-761, ago. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2007.05.006>.

[31] PERSISTANCE MARKET RESEARCH, **Biomaterials Market: Global Industry Analysis and Forecast 2016 - 2024**. New York: [s.i.], 2017. Disponível em: <<https://www.persistencemarketresearch.com/market-research/biomaterials-market.asp>>. Acesso em: 26 fev. 2018.

[32] ROHAN (USA). Markets And Markets. **Markets and Markets: Brazil Biomaterials Market worth US\$1.7 Billion by 2015**.Northbrook: [s.l.], 2017. Disponível em: <<https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/brazil-biomaterials.asp>>. Acesso em: 23 fev. 2018.

[33] MARKETS AND MARKETS (USA). **Brazil Biomaterials Market (2010-2015)**. Northbrook: [s.i.], 2017. Disponível em: <<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/biomaterial-392.html>>. Acesso em: 20 fev. 2018.

[34] HENCH, L. L.; BEST, S.. Classes of Materials Used in Medicine: Ceramics, Glasses, and Glass-Ceramics. In: RATNER, Buddy D. et al. **Biomaterials Science: An Introduction to Materials in Medicine**. 2. ed. San Diego: Elsevier Inc, 2004. Cap. 210. p. 153-169.

[35] HAUBENREICH, J. E. et al. Did We Push Dental Ceramics Too Far? A Brief History of Ceramic Dental Implants. **Journal Of Long-term Effects Of Medical Implants**, New York, v. 15, n. 6, p.617-628, 2005. Begell House. <http://dx.doi.org/10.1615/jlongtermeffmedimplants.v15.i6.50>.

- [36] PEZZOTTI, G.; YAMAMOTO, K.. Artificial hip joints: The biomaterials challenge. **Journal Of The Mechanical Behavior Of Biomedical Materials**, Amsterdam, v. 31, p.3-20, mar. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmbbm.2013.06.001>.
- [37] AFZAL, A.. Implantable zirconia bioceramics for bone repair and replacement: A chronological review. **Materials Express**, Valencia, v. 4, n. 1, p.1-12, 1 fev. 2014. American Scientific Publishers. <http://dx.doi.org/10.1166/mex.2014.1148>.
- [38] PICONI, C.; MACCAURO, G.. Zirconia as a ceramic biomaterial. **Biomaterials**, Guilford, v. 20, n. 1, p.1-25, jan. 1999. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0142-9612\(98\)00010-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0142-9612(98)00010-6).
- [39] BEST, S.m. et al. Bioceramics: Past, present and for the future. **Journal Of The European Ceramic Society**, Oxford, v. 28, n. 7, p.1319-1327, jan. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.12.001>.
- [40] DOROZHKIN, Sergey V.. Bioceramics of calcium orthophosphates. **Biomaterials**, Guilford, v. 31, n. 7, p.1465-1485, mar. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biomaterials.2009.11.050>.
- [41] GUASTALDI, A. C.; APARECIDA, A. H.. Fosfatos de Cálcio de interesse biológico: Importância como biomateriais, propriedades e métodos de obtenção de recobrimentos. **Química Nova**, São Paulo, v. 33, n. 6, p.1352-1358, jun. 2010.
- [42] APARECIDA, A.H. et al. Estudo da influência dos íons K⁺, Mg²⁺, SO₄(²⁻) e CO₃(²⁻) na cristalização biomimética de fosfato de cálcio amorfo (ACP) e conversão a fosfato octacálcico (OCP). **Química Nova**, São Paulo, v. 30, n. 4, p.892-896, ago. 2007. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422007000400024>.
- [43] THAMARAISELVI, T. V.; RAJESWARI, S.. Biological Evaluation of Bioceramic Materials - A Review. **Trends Biomaterials And Artificial Organs**, Thiruvananthapuram, v. 18, n. 1, p.9-17, 2004.
- [44] SIQUEIRA, R.L.; ZANOTTO, E.D.. Biosilicato®: histórico de uma vitrocerâmica brasileira de elevada bioatividade. **Química Nova**, São Paulo, v.

34, n. 7, p.1231-1241, 2011. [Http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422011000700023](http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422011000700023).

[45] JONES, J. R.. Review of bioactive glass: From Hench to hybrids. **Acta Biomaterialia**, Oxford, v. 9, n. 1, p.4457-4486, jan. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actbio.2012.08.023>.

[46] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 6474-1:2010**: Implants for Surgery - Ceramic Materials - PART 1: Ceramic Materials Based on High Purity Alumina. Genebra: [s.i.], 2010.

[47] FERRARIS, E, et al. Shaping of engineering ceramics by electro, chemical and physical processes. **Cirp Annals – Manufacturing Technology**, Amsterdam, v. 65, n. 2, p.761-784, 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.001>.

[48] BARRÈRE, F. et al. Calcium phosphate interactions with titanium oxide and alumina substrates: an XPS study. **Journal Of Materials Science: Materials in Medicine**, Dordrecht, v. 14, n. 5, p.419-425, 2003. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1023/a:1023210817683>.

[49] SOON, G. et al. Review of zirconia-based bioceramic: Surface modification and cellular response. **Ceramics International**, Oxford, v. 42, n. 11, p.12543-12555, ago. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.05.077>.

[50] HENCH, L. L.. Bioceramics: From Concept to Clinic. **Journal Of The American Ceramic Society**, Hoboken, v. 74, n. 7, p.1487-1510, jul. 1991. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1151-2916.1991.tb07132.x>.

[51] HENCH, L. L.. Bioceramics. **Journal Of The American Ceramic Society**, Hoboken, v. 81, n. 7, p.1705-1728, 21 jan. 2005. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1151-2916.1998.tb02540.x>.

[52] MANICONE, P. F.; IOMMETTI, P. R.; RAFFAELLI, L.. An overview of zirconia ceramics: Basic properties and clinical applications. **Journal Of Dentistry**, Oxford, v. 35, n. 11, p.819-826, nov. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jdent.2007.07.008>.

- [53] RAHAMAN, M. N. et al. Bioactive glass in tissue engineering. **Acta Biomaterialia**, Oxford, v. 7, n. 6, p.2355-2373, jun. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actbio.2011.03.016>.
- [54] LEGEROS, R. Z.. Properties of Osteoconductive Biomaterials: Calcium Phosphates. **Clinical Orthopaedics And Related Research**, Philadelphia, v. 395, p.81-98, fev. 2002. Ovid Technologies (Wolters Kluwer Health). <http://dx.doi.org/10.1097/00003086-200202000-00009>.
- [55] HENCH, L. L.. Biomaterials: a forecast for the future. **Biomaterials**, Guilford, v. 19, n. 16, p.1419-1423, ago. 1998. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0142-9612\(98\)00133-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0142-9612(98)00133-1).
- [56] SALINAS, A. J.; ESBRIT, P.; VALLET-REGÍ, M.. A tissue engineering approach based on the use of bioceramics for bone repair. **Biomaterials Science**, Cambridge, v. 1, n. 1, p.40-51, 2013. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/c2bm00071g>.
- [57] KUMAR, A. et al. Low temperature additive manufacturing of three dimensional scaffolds for bone-tissue engineering applications: Processing related challenges and property assessment. **Materials Science And Engineering: R-Reports**, Lausanne, v. 103, p.1-39, maio 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mser.2016.01.001>.
- [58] JONES, J. R.. Reprint of: Review of bioactive glass. **Acta Biomaterialia**, Oxford, v. 23, p.53-82, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actbio.2015.07.019>.
- [59] VOLPATO, N. (Org.). **Manufatura Aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017. 400 p.
- [60] MORENO, M. S. M.S.. **Engenharia de Tecidos na substituição de tecido ósseo**. 2014. 61 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Farmacêuticas), Faculdade de Ciências da Saúde, Universidade Fernando Pessoa, Porto, 2014.
- [61] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/ASTM 52900:2015: Additive Manufacturing- General Principles -Terminology**. Genebra: [s.i.], 2015. 19 p.

[62] SEITZ, H. et al. Three-dimensional printing of porous ceramic scaffolds for bone tissue engineering. **Journal Of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials**, Hoboken, v. 74, n. 2, p.782-788, 2005. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/jbm.b.30291>.

[63] 3D SYSTEMS (USA). **O que é estereolitografia (SLA)?** 2017. Disponível em: <<https://br.3dsystems.com/resources/information-guides/stereolithography/sla>>. Acesso em: 08 fev. 2017.

[64] AHRENS, C. H.. Processos de AM por fotopolimerização em cuba. In: VOLPATO, N. (Org.). **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017. Cap. 6. p. 129-144.

[65] BRUNELLO, G. et al. Powder-based 3D printing for bone tissue engineering. **Biotechnology Advances**, Oxford, v. 34, n. 5, p.740-753, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biotechadv.2016.03.009>.

[66] BOSE, S. et al. Additive manufacturing of biomaterials. **Progress In Materials Science**, Oxford, v. 93, p.45-111, abr. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.08.003>.

[67] HUANG, Y. et al. 3D bioprinting and the current applications in tissue engineering. **Biotechnology Journal**, Weinheim, v. 12, n. 8, p.1-16, 4 jul. 2017. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/biot.201600734>.

[68] VOLPATO, N.; CARVALHO, J.; FORTULAN, C. A.. Processos de AM por jateamento de material e jateamento de aglutinante. In: VOLPATO, N. (Org.). **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017. Cap. 8. p. 181-212.

[69] HWA, L. C. et al. Recent advances in 3D printing of porous ceramics: A review. **Current Opinion In Solid State And Materials Science**, Oxford, v. 21, n. 6, p.323-347, dez. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cossms.2017.08.002>.

[70] WITHELL, A. et al. Porous ceramic filters through 3D printing. **Innovative Developments In Virtual And Physical Prototyping**, [s.l.], p.313-318, 16 set. 2011. CRC Press. <http://dx.doi.org/10.1201/b11341-50>.

[71] KHALYFA, A. et al. Development of a new calcium phosphate powder-binder system for the 3D printing of patient specific implants. **Journal Of Materials Science: Materials in Medicine**, Dordrecht, v. 18, n. 5, p.909-916, 11 jan. 2007. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10856-006-0073-2>.

[72] LIMA, M. S. F.. Processo de AM por adição de lâminas, deposição com energia direcionada e híbridos. In: VOLPATO, N. (Org.). **Manufatura Aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017. Cap. 11. p. 271-292.

[73] ADDITIVE MANUFACTURING RESEARCH GROUP (Loughborough). Loughborough University (Ed.). **Directed Energy Deposition**. Disponível em: <<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/directedenergydeposition/>>. Acesso em: 23 abr. 2018.

[74] VOLPATO, N.. Processos de AM por extrusão de material. In: VOLPATO, N. (Org.). **Manufatura Aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017. Cap. 7. p. 145-180.

[75] SILVA, J. V. L.. Processos de AM por fusão de leito de pó não metálico. In: VOLPATO, N. (Org.). **Manufatura Aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017. p. 213-246.

[76] SWIFT, K. G.; BOOKER, P. D.. Processos de prototipagem rápida. In: SWIFT, K. G.; BOOKER, P. D.. **Seleção de processos e manufatura**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. Cap. 8. p. 227-241.

[77] KLOSTERMAN, D. et al. Laminated Object Manufacturing, a New Process for the Direct Manufacture of Monolithic Ceramics and Continuous Fiber CMCs. **Proceedings Of The 21st Annual Conference On Composites, Advanced Ceramics, Materials, And Structures—b: Ceramic Engineering and Science Proceedings**, Hoboken, v. 18, n 4, v. 18, p.112-120, jan. 1997. John Wiley & Sons, Inc.. <http://dx.doi.org/10.1002/9780470294444.ch13>.

[78] MARTINO, J. P. A review of selected recent advances in technological forecasting. **Technological Forecasting And Social Change**, [s.l.], v. 70, n. 8, p.719-733, out. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0040-1625\(02\)00375-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0040-1625(02)00375-x).

[79] OLIVEIRA, B.S.. **Indicadores de patentes para o monitoramento tecnológico em aços para dutos utilizados em transporte de**

hidrocarbonetos. 2016. 93 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2016.

[80] CHANCHETTI, L. F.. **Cientometria aplicada a materiais para armazenamento de hidrogênio.** 2014. 89 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

[81] MILANEZ, D. H.. **Elaboração de indicadores de Ciência e Tecnologia para o monitoramento de avanços tecnológicos em nanocelulose.** 2015. 187 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2015.

[82] FARIA, L. I. L.. **Prospecção tecnológica em materiais:** aumento da eficiência do tratamento bibliométrico - aplicação na análise de tratamentos de superfície resistentes ao desgaste. 2001. 187 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2001.

[83] LEITE, A. L. C. B.. **Carvão Vegetal:** desenvolvimento de indicadores tecnológicos a partir da análise de documentos de patente. 2013. 145 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.

[84] OKUBO, Y.. **Bibliometric Indicators and Analysis of Research Systems: Methods and Examples.** **Oecd Science, Technology And Industry Working Papers**, [s.l.], p.1-70, 1 jan. 1997. Organisation for Economic Co-Operation and Development (OECD). <http://dx.doi.org/10.1787/208277770603>.

[85] MUGNAINI, R.; JANNUZZI, P. M.; QUONIAM, Luc. Indicadores bibliométricos da produção científica brasileira: uma análise a partir da base Pascal. **Ciência da Informação**, Brasília, v. 33, n. 2, p.123-131, maio 2004.

[86] FARIA, L. I. L.. **Bibliometria. Curso de Bibliometria e Indicadores Científicos.** 2015. Universidade Federal de São Carlos.

[87] LEZAMA-NICOLÁS, R. et al. A bibliometric method for assessing technological maturity: the case of additive manufacturing. **Scientometrics**,

Dordrecht, v. 117, n. 3, p.1425-1452, 1 nov. 2018. Springer Nature.
<http://dx.doi.org/10.1007/s11192-018-2941-1>.

[88] YU, H. et al. Research on Literature Involving Zirconia-Based on Pubmed Database: A Bibliometric Analysis. **Current Science**, Bangalore, v. 112, n. 06, p.1134-1137, 1 mar. 2017. Current Science Association.
<http://dx.doi.org/10.18520/cs/v112/i06/1134-1137>.

[89] WEN, Yu et al. 3D printed porous ceramic scaffolds for bone tissue engineering: a review. **Biomaterials Science**, Cambridge, v. 5, n. 9, p.1690-1698, 2017. Royal Society of Chemistry (RSC).
<http://dx.doi.org/10.1039/c7bm00315c>.

[90] FARIA, L. I. L. (Ed.). Análise da produção científica a partir de publicações em periódicos especializados: Anexo Metodológico. In: SÃO PAULO. C. H. B. Cruz. Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Org.). **Indicadores de Ciência, Tecnologia e Inovação em São Paulo 2010**. São Paulo: Fapesp, 2011. Cap. 4. p. A3 - A14.

[91] MILANEZ, D. H.. **Nanotecnologia: indicadores tecnológicos sobre os avanços em materiais a partir da análise de documentos de patentes**. 2011. 176 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

[92] CAPES. **Web of Science** - Coleção Principal. Disponível em: <http://www-periodicos-capes-gov-br.ez31.periodicos.capes.gov.br/index.php?option=com_pcollection&mn=70&smn=79&cid=81&Itemid=&>.

[93] BEAU JACKSON. 3D Printing Industry. **GE Loans to expand metal additive manufacturing**. 2017. Disponível em: <<https://3dprintingindustry.com/news/ge-loans-expand-metal-additive-manufacturing-102240/>>. Acesso em: 13 abr. 2019.

[94] ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA. Manufacturing USA. U.S. Government (Ed.). **Funding**. 2018. Disponível em: <<https://www.manufacturing.gov/funding>>. Acesso em: 13 abr. 2019.

[95] RUSHABH HARIA. 3D Printing Industry. **China state action plan aims to make 3D Printing worth \$3 Billion by 2020**. 2017. Disponível em:

<<https://3dprintingindustry.com/news/china-action-plan-3d-printing-3-billion-2020-126119>>. Acesso em: 13 abr. 2019.

[96] AGARWALA, M. K. et al. Structural quality of parts processed by fused deposition. **Rapid Prototyping Journal**, Bingley, v. 2, n. 4, p.4-19, dez. 1996. Emerald. <http://dx.doi.org/10.1108/13552549610732034>.

[97] SZE, S. M.; KWOK, K.n.. Part V: Photonic devices and sensors. In: SZE, S. M.; KWOK, K.n.. **Physics of semiconductor devices**. 3rd. ed. Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2006. p. 601-772.

[98] LIMOGES COLLECTOR (França) (Ed.). **History, information and sights of Limoges, The porcelain capital of France**. 2019. Disponível em: <<https://limogescollector.com/about-limoges-france>>. Acesso em: 09 abr. 2019.

[99] LOWE, James S.; ANDERSON, Peter G.. **Stevens & Lowe's Human Histology**. 4. ed. Philadelphia: Elsevier, 2015.

[100] EXONE. **Technology overview**. Disponível em: <<http://www.exone.com/Resources/Technology-Overview>>. Acesso em: 21 maio. 2018.

[101] VOXELJET. **Productivity in 3D**: printing systems from VoxelJet. Disponível em: <<https://www.voxeljet.com/3d-printing-systems/>>. Acesso em: 21 maio. 2018.

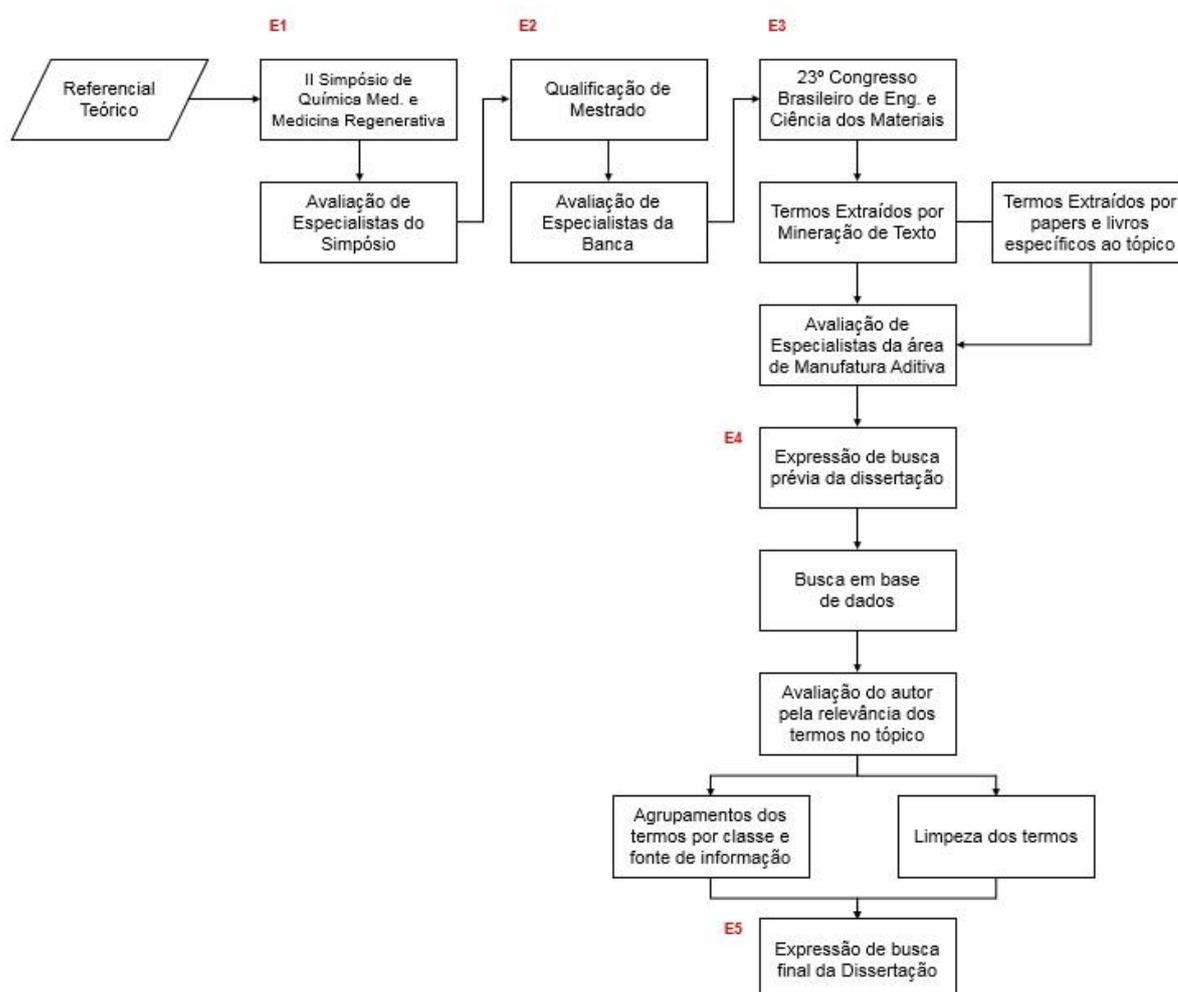
APÊNDICE A – DEFINIÇÕES DE BIOMATERIAIS

Fonte	Definição
[14]	“Qualquer substância (diferente de uma droga) ou combinação de substâncias, de origem sintética ou natural, que possa ser utilizada por qualquer período de tempo, como um todo ou como parte de um sistema que trata, aumenta ou substitui qualquer tecido, órgão ou função do corpo; qualquer material para restaurar e melhorar a função em organismos com uma interação entre materiais viáveis e não viáveis; um material não viável usado em um dispositivo médico destinado a interagir com sistemas biológicos.”
[3]	“Dispositivos que entram em contato com sistemas biológicos (incluindo fluidos biológicos), com aplicações diagnósticas, vacinais, cirúrgicas ou terapêuticas, podendo ser constituídos de compostos de origem sintética ou natural, assim como de materiais naturais quimicamente modificados, tanto na forma de sólidos quanto de géis, pastas ou mesmo líquidos, não sendo necessariamente fabricados, como válvulas cardíacas de porcos e retalhos de pele humana tratados para uso como implantes.”
[13]	“O biomaterial é uma substância biológica ou sintética usada para fazer dispositivos para substituir uma parte ou um órgão de um modo seguro, confiável e compatível com o corpo. Os biomateriais podem ser extraídos da natureza ou sintetizados usando processos artificiais. O uso de biomateriais é baseado em fatores como biocompatibilidade, biofuncionalidade e disponibilidade.”
[16]	“... como qualquer substância (diferente de um fármaco) ou combinação de substâncias, de origem sintética ou de origem natural, que pode ser utilizada por qualquer período de tempo, como um todo ou como parte de um sistema que trata, aumenta ou substitui qualquer tecido, órgão ou função do corpo.”
[15]	“Biomateriais são materiais de origem biológica ou sintética utilizados para confecção de implantes, aparelhos ou sistemas que estarão em contato com sistemas biológicos e tecidos vivos com objetivos de reparar perdas teciduais e restaurar funções comprometidas por processos degenerativos ou traumatismos”
[17]	“Biomateriais são materiais (sintéticos ou naturais; sólidos ou, às vezes, líquidos) utilizados em dispositivos médicos ou em contato com sistemas biológicos”
[18]	“Biomateriais é um termo utilizado para indicar materiais que constituem partes de implantes médicos, dispositivos extracorpóreos e descartáveis que são utilizados na medicina, cirurgia, odontologia e medicina veterinária, bem como em todos os aspectos dos cuidados da saúde do paciente”
[5]	“Biomaterial é um material destinado a interfacear com o sistema biológico para avaliar, tratar, aumentar, ou substituir qualquer tecido, órgão ou função do corpo”

APÊNDICE B – TERMINOLOGIA DE MANUFATURAS ADITIVAS POR DIFERENTES FONTES DE INFORMAÇÕES

B.1 Procedimento geral de formulação da expressão de busca

Para a construção da expressão de busca nesta dissertação, foram utilizadas etapas de familiarização com o conhecimento do referencial teórico, realização de apresentações em congressos e avaliação dos termos em bases de dados, e com especialistas do meio acadêmico. A Figura B.1 mostra as etapas principais em que se construiu a expressão de busca desta dissertação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura B.1 - Fluxograma da construção da expressão de busca final da dissertação.

Na Figura B.1 é possível ver conotações de expressões de busca, ao passo que estas sofreram mudanças. Assim, quando se iniciou esta dissertação, um estudo exploratório foi apresentado, e para tal, a expressão de busca E1 foi utilizada. Com a apresentação deste estudo, uma primeira avaliação da metodologia como um todo foi realizada. Deste modo, outras versões foram sendo criadas e avaliadas subjetivamente para conseguir chegar na expressão de busca desta dissertação (expressão E5).

Por fim, é possível compreender que as avaliações e separação dos termos por meio do agrupamento destes em três *clusters*: por fonte de informação, se são termos gerais ou específicos de um processo de MA, e qual a sua relação nas bases de dados para com a avaliação dos especialistas. Nas próximas seções deste apêndice serão discutidos os detalhes de cada processo da composição da expressão de busca.

B.2 Terminologia definida em normas nacionais e internacionais.

Com a evolução da tecnologia de manufatura aditiva no mundo, se fez necessário a padronização das classes dessa manufatura e, conseqüentemente, a sua terminologia. Assim, em 2015 a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) em conjunto com a *International Organization for Standardization* (ISO) fizeram público a norma ISO/ASTM 52900:2015 que

estabelece e define os termos utilizados na tecnologia de manufatura aditiva (MA), que aplica ao princípio da modelagem aditiva e assim, constrói geometrias físicas em 3D por adição sucessiva de material. [61]

Pela união da comissão ISO/TC 261 e do comitê ASTM F42, foram definidas sete classes de manufatura aditiva. São elas:

- Deposição Direcionada de Energia;
- Modelagem por Deposição de Fundido;

- Fusão de Leito em Pó;
- Jateamento de Ligante;
- Jateamento de Material;
- Laminação de Folhas; e
- Polimerização em Cubas.

Com isso, se construiu duas tabelas, sendo a primeira para termos gerais e a segunda para específicos, de modo que a avaliação final dos especialistas fosse vista em conjunto com o retorno de publicações científicas na base de dados. As duas últimas colunas dizem respeito a avaliação do autor levando em consideração todas as informações previamente demonstradas, tornando mais fácil a análise e o parecer final da inclusão do termo na expressão de busca E5.

Tabela B.1 - Terminologia Geral definida em norma com a análise de especialistas e parecer técnico da utilização na expressão de busca.

#	Termos Gerais	Avaliação de Especialistas			Retorno	Análise	Parecer Final
		A1	A2	A3			
#1	3D Printing	Sim	Sim	Sim	17490		Sim
#2	Additive Manufacturing				10266		Sim
#4	Rapid Prototyping				12380		Sim

Fonte: Elaborado pelo autor desta pesquisa.

Tabela B.2 - Terminologia Específica definida em norma com a análise de especialistas e parecer técnico da utilização na expressão de busca.

#	Termos Específicos	Avaliação de Especialistas			Retorno	Análise	Parecer Final
		A1	A2	A3			
#5	Binder Jetting	Sim	Sim	Sim	143		Sim
#6	Directed Energy Deposition	Sim	Sim	Sim	222		Sim
#7	Material Extrusion	Sim	Sim	Sim	188	Pode confundir, usar sinônimos	Não
#8	Material Jetting	Sim	Sim	Sim	91		Sim
#9	Powder Bed Fusion	Sim	Sim	Sim	509		Sim
#10	Sheet Lamination	Sim	Sim	Sim	71		Sim
#11	Vat Polymerization	Sim	Sim	Sim	11		Sim

Fonte: Elaborado pelo autor desta pesquisa.

B.3 Terminologia definida por mineração de texto

Tabela B.3 - Termos gerais dos processos de manufaturas aditivas definidos em norma, extraídos por mineração de texto.

#	Termos Gerais	Avaliação de Especialistas			Retorno	Análise	Parecer Final
		A1	A2	A3			
#12	Advanced Manufacturing	Sim	Não	Sim	2719	Muito geral	Não
#13	Additive Fabrication	Sim	Sim	Não	244	Muito geral	Não
#14	Automated Fabrication	-	Sim	-	146	SIM	Sim
#15	Computer Aided Design	Sim	Sim	Não	16280	Muito geral	Não
#16	Computer Aided Design Manufacturing	Sim	Não	Não	80	SIM	Sim
#17	Computer-Aided Engineering	Sim	Sim	Não	1889	NÃO	Não
#18	Computer-Aided Manufacturing	Sim	Sim	Não	1970	NÃO	Não
#19	Computer-Numerical Controlled	Sim	Sim	Não	2007	NÃO	Não
#20	Direct Digital Manufacturing	Sim	Sim	Sim	86	sim	Sim
#21	Freeform fabrication	Sim	Sim	Não	1438	sim	Sim
#22	Laser Prototyping	Sim	Sim	Sim	83	SIM	Sim
#23	Layer Manufacturing Technique	Sim	Sim	Sim	66	SIM	Sim
#24	layer-based manufacturing	-	Sim	-	26	SIM	Sim
#25	Layered manufacturing	Sim	Sim	Sim	1056	SIM	Sim
#26	Rapid Casting	Sim	Sim	Não	82	sim	Sim
#27	Rapid Processing	Sim	Não	Não	2224	Não	Não
#28	Rapid Prototyping	-	Sim	-		SIM	Sim
#29	Rapid Prototyping Technique	-	Não	-		SIM	Sim
#30	Rep Rap	Sim	Sim	Não	7	Nome utilizado para um projeto.	Não
#31	Roll Powder Sintering	Sim	Não	Não	6	Não	Não
#32	Solid free formation	Sim	Não	Não	0	Retorno 0, não utilizar.	Não
#33	Solid freeform fabrication	-	Sim	-	871	SIM	Sim
#34	Three Dimensional Powder Printing	Sim	Sim	Sim	27	Sim	Sim

Fonte: Elaborado pelo autor desta pesquisa.

Tabela B.4 - Termos Específicos dos processos de manufatura aditiva definidos em norma, extraídos por mineração de dados.

#	Termos Específicos	Avaliação de Especialistas			Retorno	Análise	Parecer Final
		A1	A2	A3			
#3 5	Continuous Liquid Interface Production technology	Sim	Sim	-	0	Retorno 0, não utilizar.	Não
#3 6	Digital Light Processing	Sim	Sim	Não	403	É parte do processo de mask projection VP (SL)	Não
#3 7	Digital Light Synthesis	-	Sim	-	2	Não é MA	Não
#3 8	Direct ink printing	Sim	Sim	Sim	1	SIM	Sim
#3 9	Direct Ink writing	Sim	Sim	Não	161	SIM	Sim
#4 0	Direct Metal Deposition	Sim	Sim	Sim	488	SIM	Sim
#4 1	Direct Metal Laser Sintering	Sim	Sim	Sim	496	sim	Sim
#4 2	Direct-Write Assembly	Sim	Sim	Não	63	SIM	Sim
#4 3	droplet-based printing technology	-	Sim	-	0	Retorno 0, não utilizar.	Não
#4 4	Electron Beam Melting	Sim	Sim	Sim	1154	SIM	Sim
#4 5	Freeze Form Extrusion Fabrication	Sim	Não	Não	11	SIM	Sim
#4 6	Laser Aided Manufacturing	Sim	Sim	Não	13	SIM	Sim
#4 7	Laser Metal Deposition	Sim	Sim	Sim	365	SIM	Sim
#4 8	Laser Powder Forming	Sim	Sim	Não	1	não	Não
#4 9	Layered Manufacturing	Sim	Sim	Sim	1056	SIM	Sim
#5 0	Layerwise Slurry Deposition	Sim	Sim	Sim	4	não	Não

#5 1	Lithography-Based Ceramic Manufacturing	Sim	Sim	Sim	60	não	Não
#5 2	Mask-less Projection Slurry Stereolithography	Sim	Sim	Não	1	SIM	Sim
#5 3	Microrobotic Deposition	Sim	Não	Não	0	Retorno 0, não utilizar.	Não
#5 4	Mold Shape Deposition Manufacturing	Sim	Sim	Não	5	SIM	Sim
#5 5	Multi Jet-Modeling	Sim	Sim	Não	21	SIM	Sim
#5 6	Multi Material Stereolithography	Sim	Sim	Não	2	NÃO	Não
#5 7	Multiphase Jet Solidification	Sim	Sim	Não	6	SIM	Sim
#5 8	Powder Extrusion Moulding	Sim	Sim	Sim	13	NÃO	Não
#5 9	Powder Layer Manufacturing	Sim	Sim	Sim	1	SIM	Sim
#6 0	Pulsed Laser Deposition	Sim	Sim	Não	27575	NÃO	Não
#6 1	Robocasting	Sim	Não	Não	135	SIM	Sim
#6 2	Selective Slury Extrusion	Sim	Sim	Não	0	Retorno 0, não utilizar.	Não
#6 3	Spray Pyrolysis Deposition	Sim	Não	Sim	475	NÃO	Não
#6 4	Stereolithography Ceramic Manufacturing	Sim	Sim	Sim	0	Retorno 0, não utilizar.	Não
#6 5	Two Photon Stereolithography	Sim	Sim	Sim	19	SIM	Sim
#6 6	Ultrasonic Additive Manufacturing	Sim	Sim	Sim	73	SIM	Sim

Fonte: Elaborado pelo autor desta pesquisa.

B.4 Terminologia definida por *papers* e livros de especialistas

Tabela B.5 - Termos Específicos do processo de Deposição Direcionada de Energia, extraídos de bibliografia.

#	Termos Específicos Dep. Direcionada de Energia	Retorno	Análise	Parecer Final
#6				
7	3d laser cladding	4	Sim	
#6				
8	controlled metal buildup	1	Não	
#6				
9	direct metal deposition	485	Sim	
#7				
0	directed light fabrication	30	Sim	
#7				
1	laser cast	3	Não	
#7				
2	laser consolidation	56	Não	
#7				
3	laser direct casting	7	Não	
#7				
4	laser engineered net shaping	342	Sim	
#7				
5	laser freeform fabrication	5	Sim	
#7				
6	laser-based metal deposition	4	Sim	
#7				
7	lasform	2	Não	
#7				
8	metal deposition	7551	Não	

Fonte: Elaborado pelo autor desta pesquisa.

Tabela B.6 - Termos Específicos do processo de Fusão de Leito em Pó, extraídos de bibliografia. Fonte: Autor

#	Termos Específicos Fusão em Leito de Pó	Retorno	Análise	Parecer Final
#7	ceramic laser sintering	8	Sim	
9				
#8	direct metal laser sintering	497	Sim	
0				
#8	electron beam melting	1155	Sim	
1				

#8 2	electron beased melting	0	Não
#8 3	high speed sintering	17	Não
#8 4	laser cusing	3	Sim
#8 5	metal laser sintering	513	Não
#8 6	polymer laser sintering	11	Não
#8 7	selective inhibition sintering	18	Sim
#8 8	selective laser melting	2805	Sim
#8 9	selective laser powder melting	0	Não
#9 0	selective laser sintering	1880	Sim
#9 1	selective mask sintering	2	Sim

Fonte: Elaborado pelo autor desta pesquisa.

Tabela B.7 - Termos Específicos do processo de Jateamento de Material, extraídos de bibliografia. Fonte: Autor

#	Termos Específicos Jateamento de Material	Retorno	Análise	Parecer Final
#9	ballistic particle			
2	manufacturing	3	Sim	
#9				
3	electrohydrodynamic inkjet	37	Não	
#9	electro-rheological fluid			
4	jetting	0	Não	
#9				
5	liquid spark jetting	0	Não	
#9				
6	multi-jet modeling	21	Sim	
#9				
7	thermal jetting	145	Não	
#9				
8	three-dimensional deposition	100	Não	

Fonte: Elaborado pelo autor desta pesquisa.

Tabela B.8 - Termos Específicos do processo de Laminação de Folhas, extraídos de bibliografia. Fonte: Autor

#	Termos Específicos Laminação de Folhas	Retorno	Análise	Parecer Final
	computer-aided manufacturing of laminated engineering materials			
#99		11	Não	
#100	offset fabbing	0	Não	
	ultrasonic additive manufacturing			
#101		73	Sim	
#102	ultrasonic consolidation	114	Sim	
#103	ultrasonic metal welding	106	Não	

Fonte: Elaborado pelo autor desta pesquisa.

Tabela B.9 - Termos Específicos do processo de Polimerização em Cubas, extraídos de bibliografia. Fonte: Autor

#	Termos Específicos Polimerização em Cubas	Retorno	Análise	Parecer Final
#104	deep x-ray lithography	0	Não	
	integrated hardened			
#105	stereolithography	0	Não	
#106	mask projection	209	Não	

#107	microstereolithography	371	Sim
#108	point wise SL	0	Retorno 0
#109	stereolithography		Sim
#110	two-photon SL		Sim
#111	vector scan	96	Não

Fonte: Elaborado pelo autor desta pesquisa.

B.5 Análise e termos finais da expressão de busca

Com o parecer final dos termos das diferentes fontes de informação, dos 105 termos iniciais, foi possível obter 52 termos os quais remetiam aos processos de manufatura aditiva. Destes, alguns necessitaram uma análise específica para não aumentar o número de publicações científicas que não fazem parte desta dissertação. Assim, pela natureza de processamento metálico, se fez o cruzamento por meio de operadores booleanos dos termos (i) deposição direta de metal, (ii) sinterização direta à laser de metal, e (iii) deposição à laser de metal com cerâmica ou biocerâmicas. Pela análise da recuperação na base de dados, foi possível concluir que estes termos estão coerentes para o escopo deste trabalho.

Em complemento, foi possível associar alguns termos pela utilização de caractere curinga e chegar na expressão de busca final desta dissertação, como mostra a tabela B4.1.

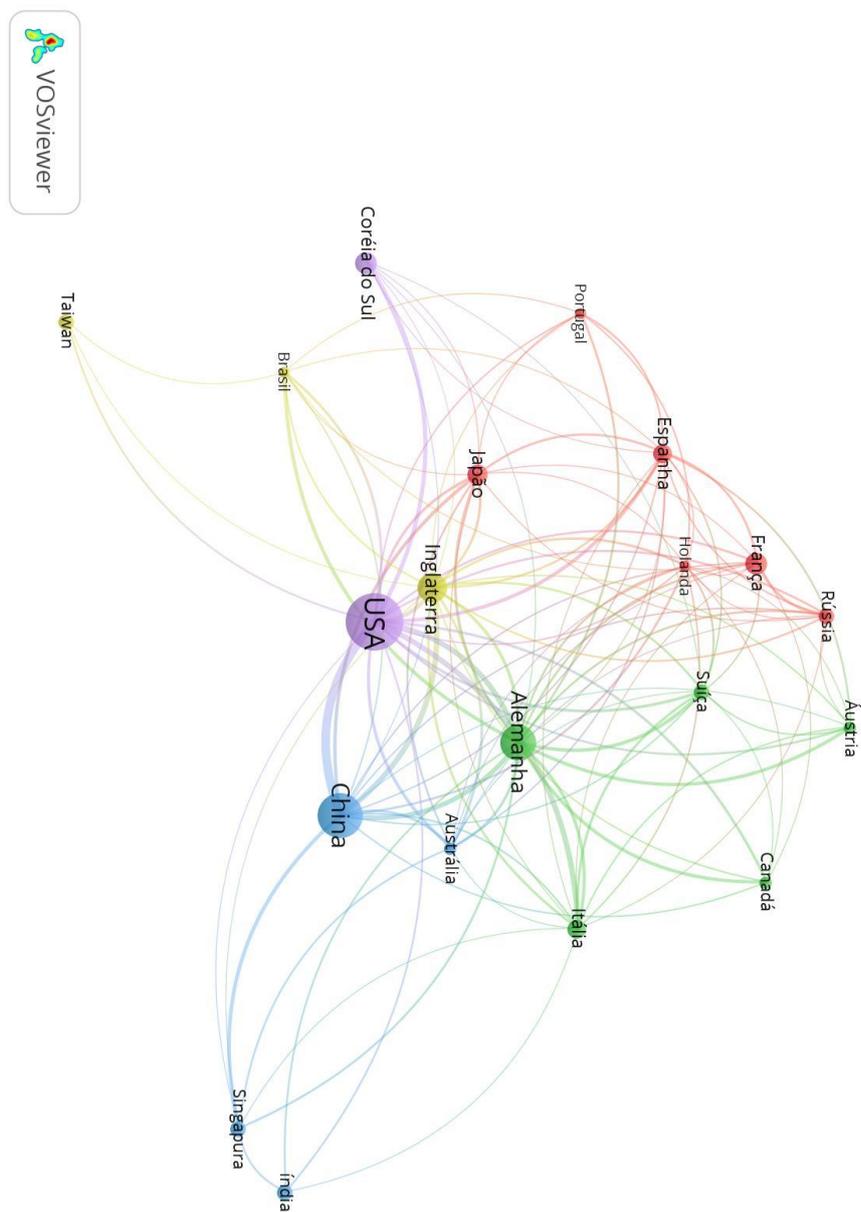
Tabela B.10 - Termos finais utilizados na expressão de busca da dissertação.

Termos da expressão de busca	
3D Laser Cladding	Laser Prototyping
3D Printing	Laser-Based Metal Deposition
Additive Manufacturing	Layer* Manufactur*
Automated Fabrication	Mask-Less Projection Slurry Stereolithography
Ballistic Particle Manufacturing	Material Jetting
Binder Jetting	Microstereolithography
Bioceramic	Mold Shape Deposition Manufacturing
Ceramic	Multi-Jet Modeling
Ceramic Laser Sintering	Multiphase Jet Solidification
Computer Aided Design Manufacturing	Powder Bed Fusion
Direct Digital Manufacturing	Powder Layer Manufacturing
Direct Ink Printing	Rapid Casting
Direct Ink Writing	Rapid Prototyping
Direct Metal Deposition	Robocasting
Direct Metal Laser Sintering	Selective Inhibition Sintering
Directed Energy Deposition	Selective Laser Melting
Directed Light Fabrication	Selective Laser Sintering
Direct-Write Assembly	Selective Mask Sintering
Electron Beam Melting	Sheet Lamination
Freeform Fabrication	Solid Freeform Fabrication
Freeze Form Extrusion Fabrication	Stereolithography
Fused Deposition Modeling	Three Dimensional Powder Printing
Laser Aided Manufacturing	Two Photon Stereolithography
Laser Cusing	Ultrasonic Additive Manufacturing
Laser Engineered Net Shaping	Ultrasonic Consolidation
Laser Metal Deposition	Vat Photopolymerization

Fonte: Elaborado pelo autor desta pesquisa.

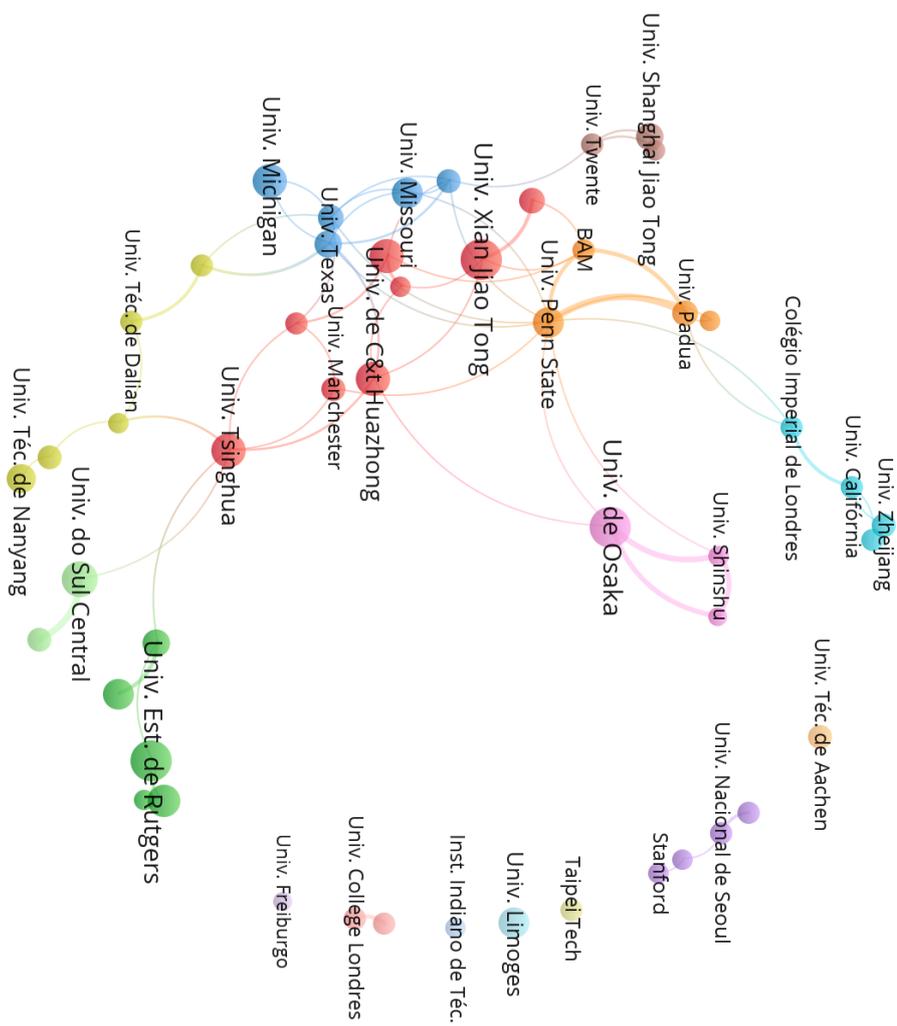
APÊNDICE C – REDES DE COLABORAÇÃO

C.1 – Redes de colaboração referentes aos dados mundiais

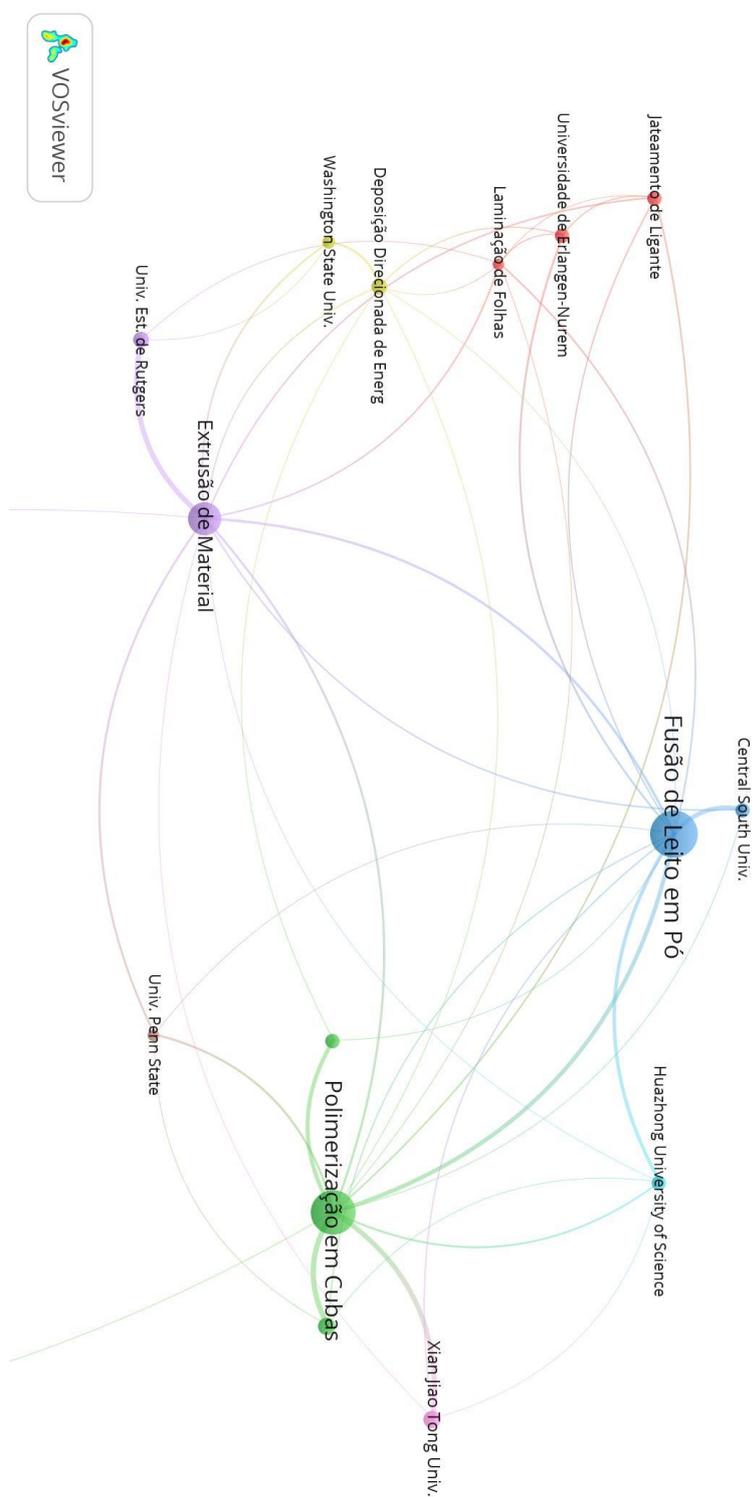


Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor no software VOSviewer.

Figura C. 1 - Rede de colaboração dos 20 principais países pesquisadores de biocerâmicas e MA.

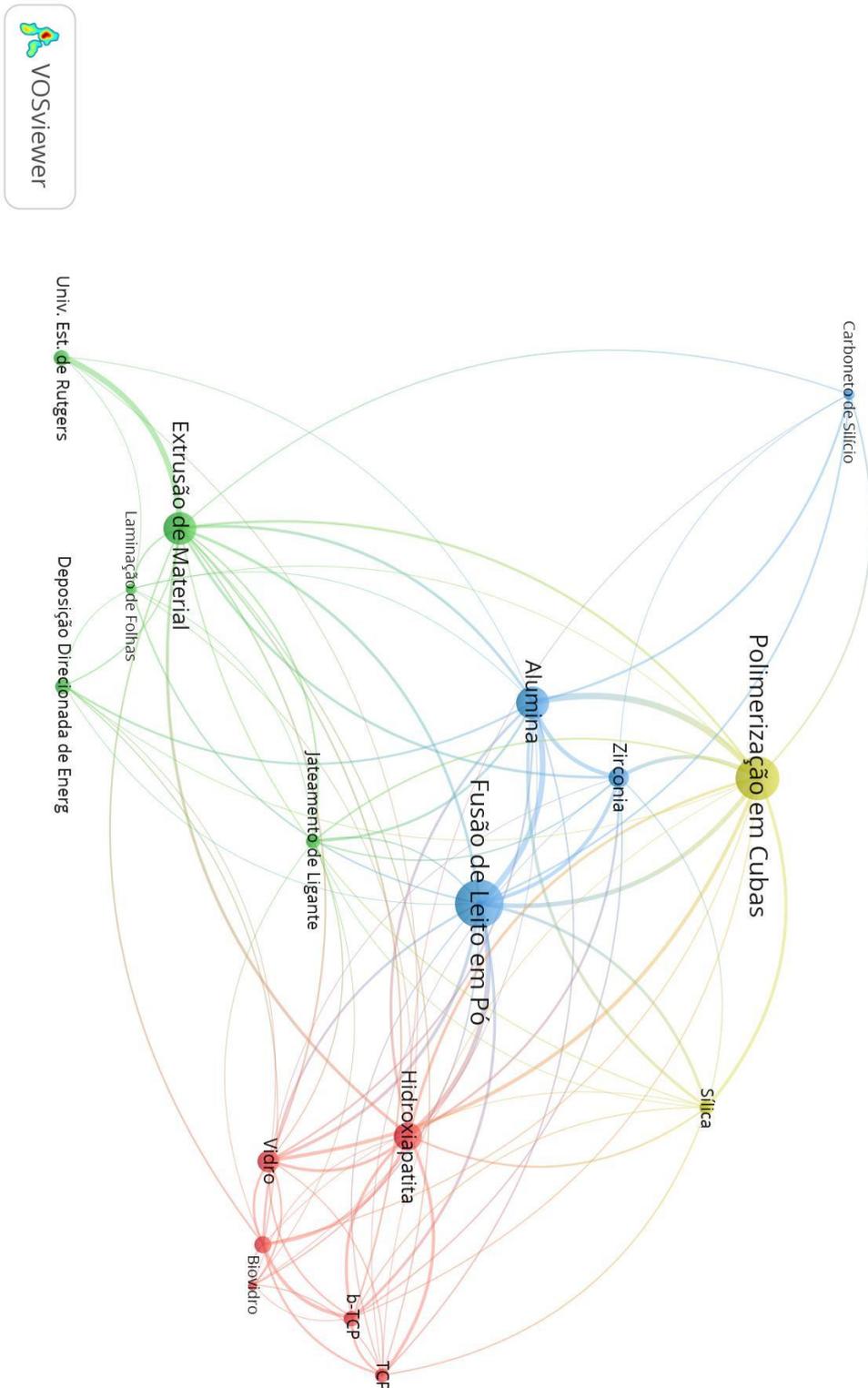


Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor no software VOSviewer.
 Figura C. 2 - Rede de colaboração entre as 50 principais Instituições mundiais pesquisadoras em biocerâmicas e MA.

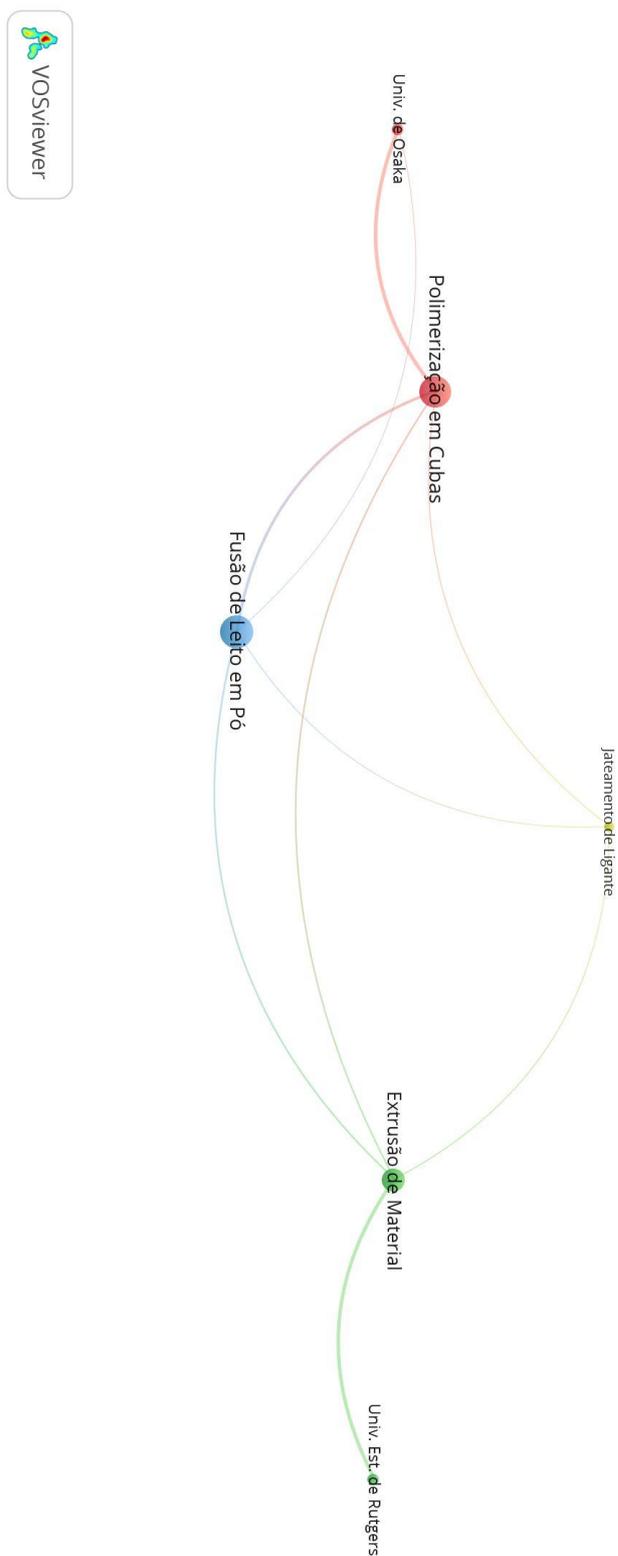


Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor no software VOSviewer.

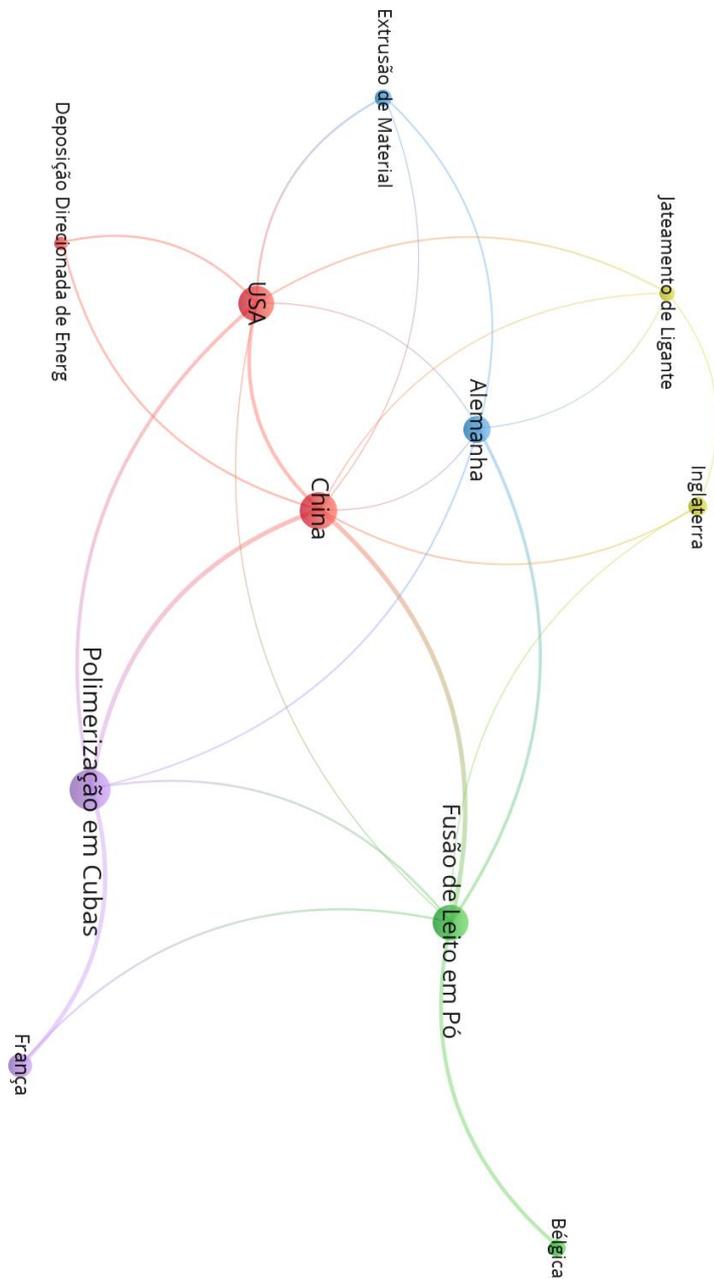
Figura C. 3 - Rede de Colaboração entre as 20 principais Instituições de pesquisa em biocerâmicas pelos processos de MA definidos em norma.



Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor no software VOSviewer.
 Figura C. 4 - Rede de colaboração de pesquisas científicas da Universidade de Rutgers (EUA) referente aos processos de MA e biocerâmicas.

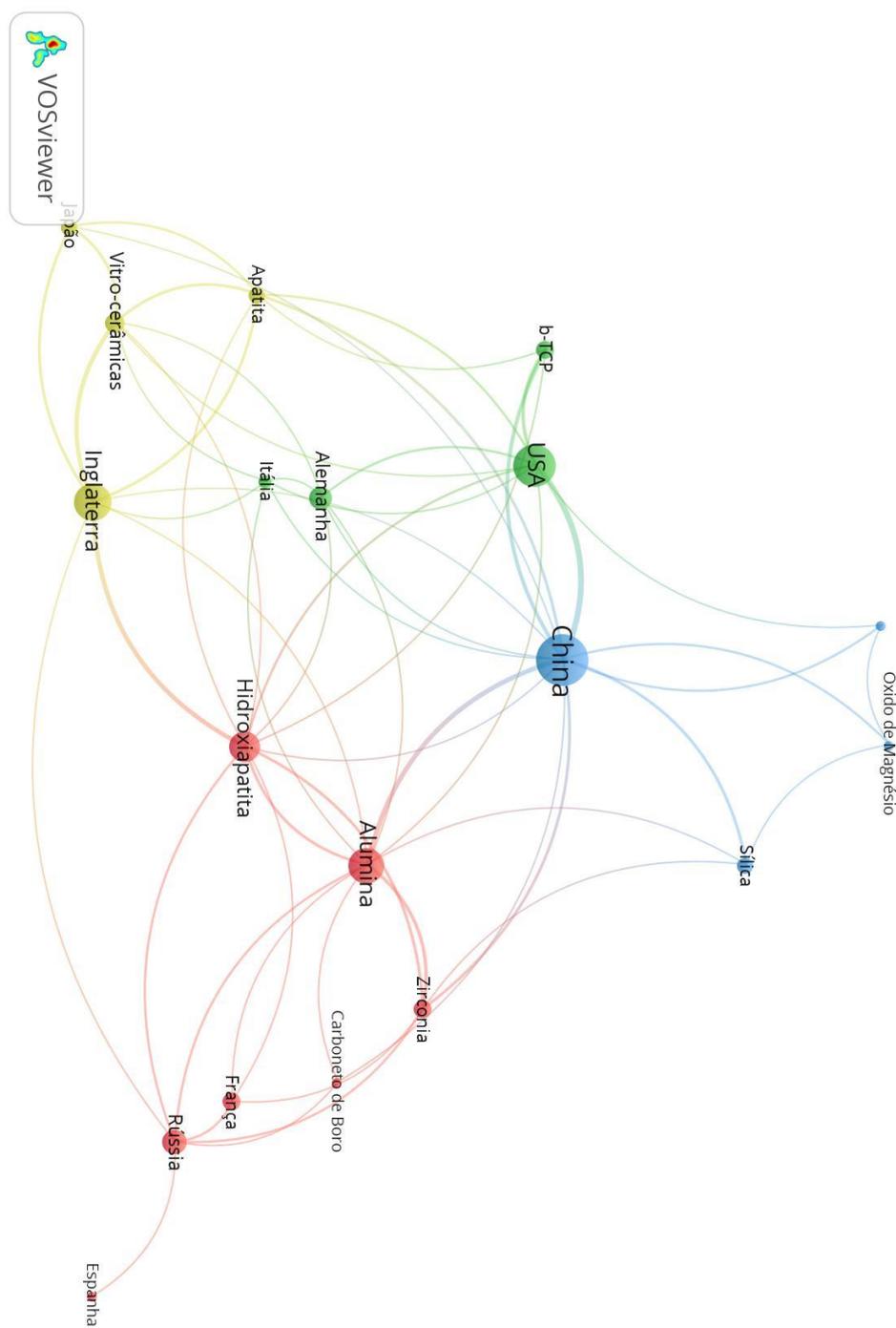


Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor no software VOSviewer.
Figura C. 5 - Rede de colaboração de pesquisas da Universidade de Osaka referente aos processos de MA descritos em norma.



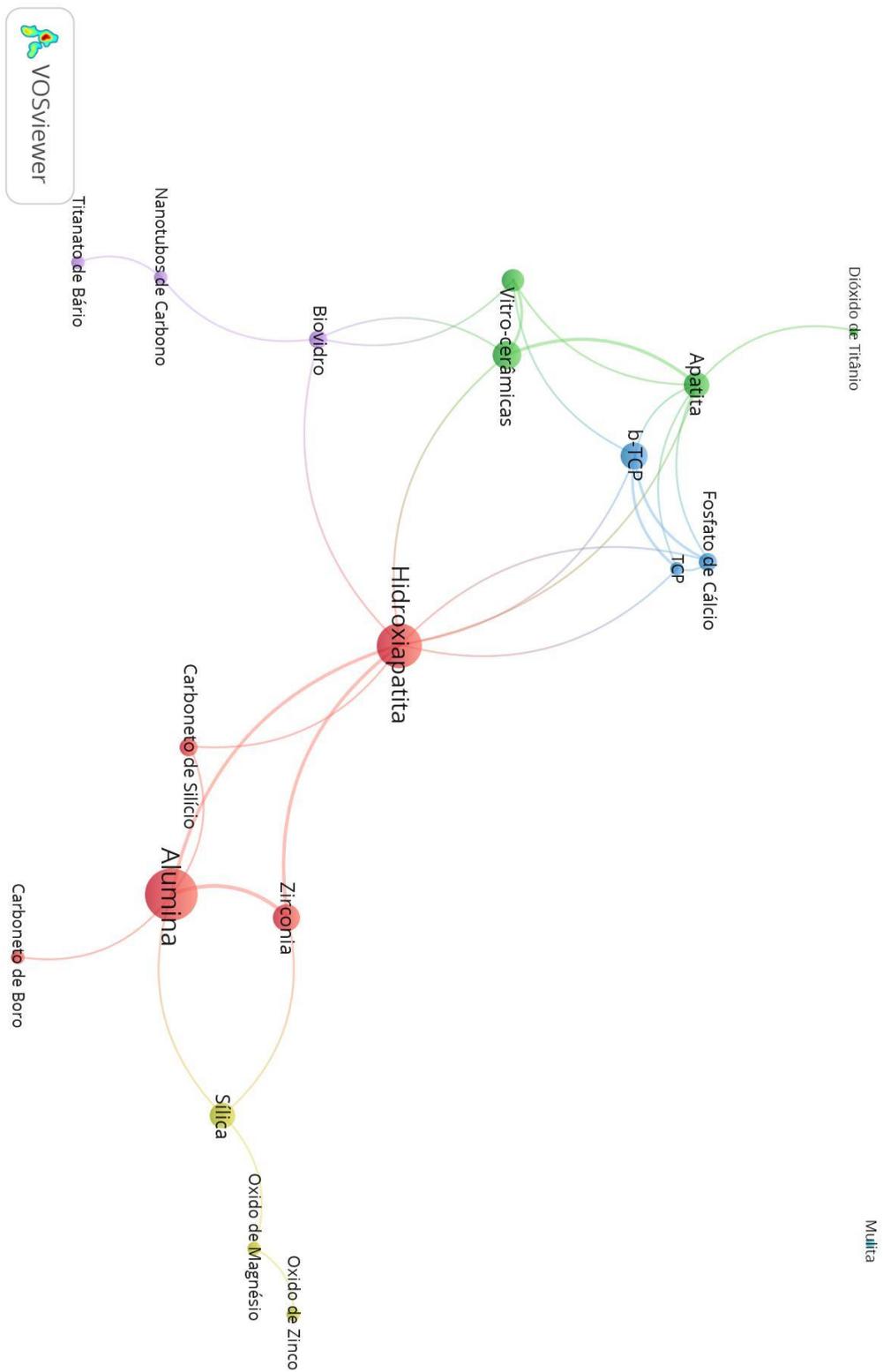
Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor no software VOSviewer.

Figura C. 6 - Rede de colaboração de pesquisas científicas em Alumina pelos processos de MA definidos em norma e os principais países que os pesquisam.



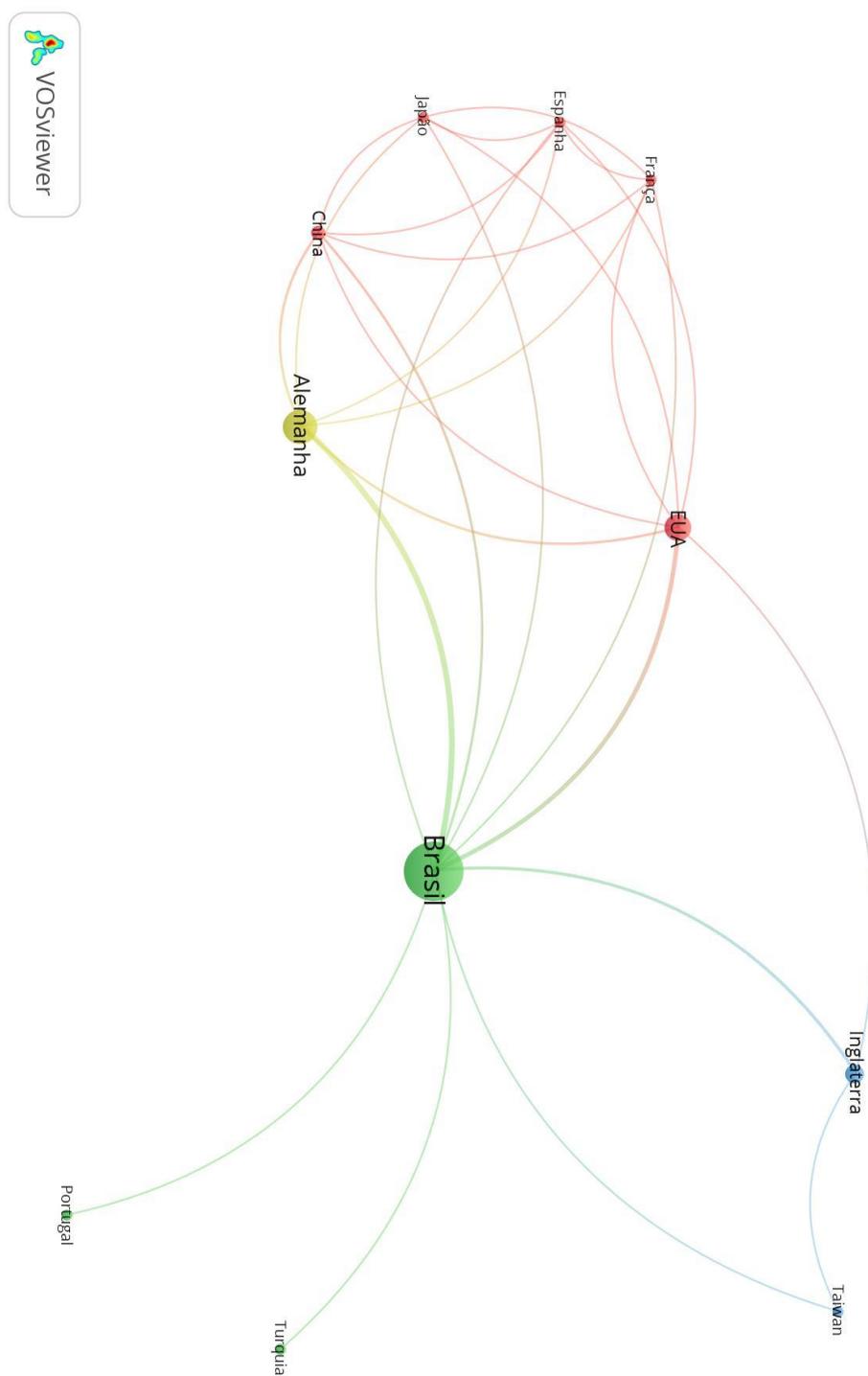
Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor no software VOSviewer.

Figura C. 7 - Rede de colaboração entre os principais países pesquisadores do processo de SLS e as biocerâmicas que estes estudam.

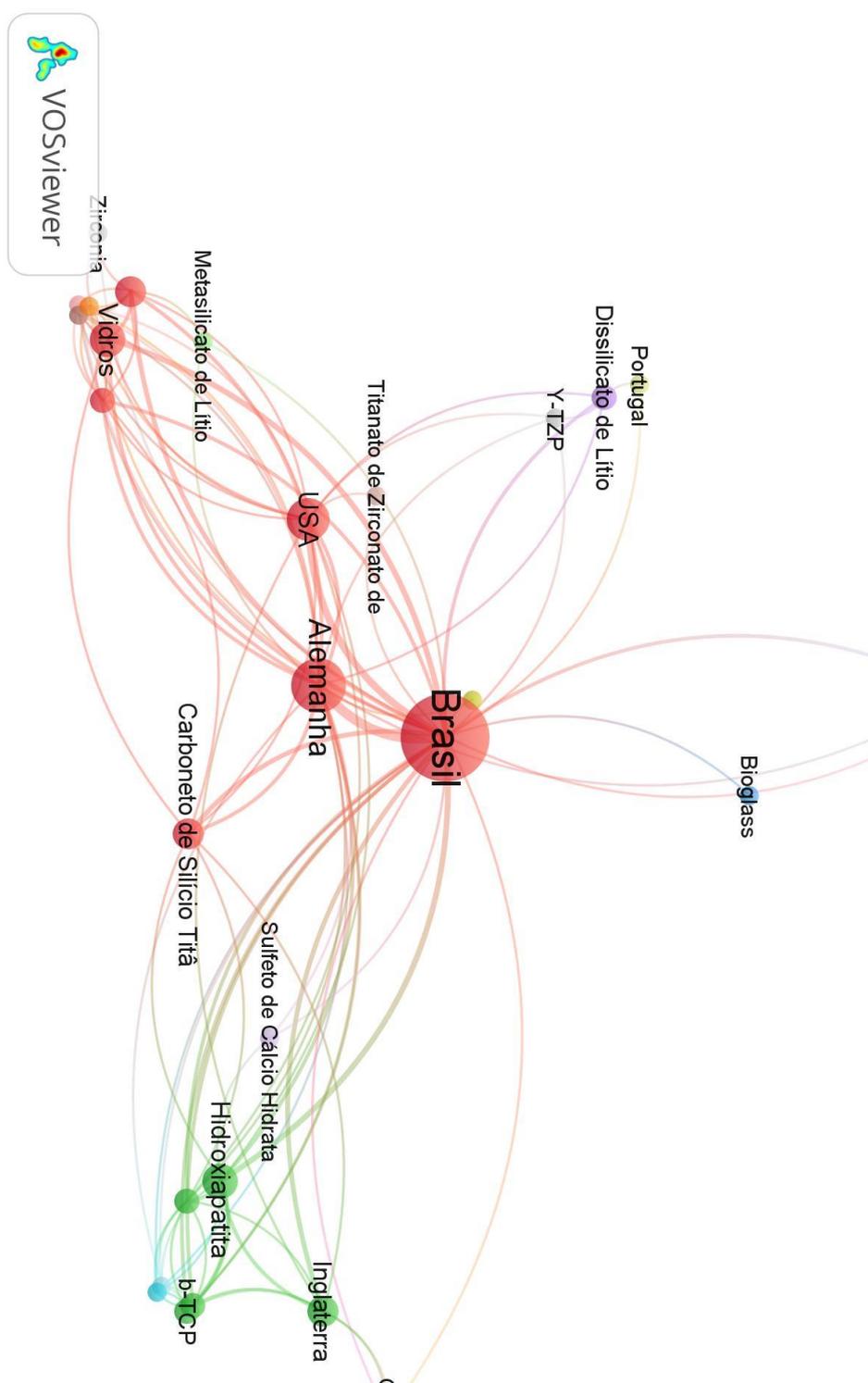


Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor no software VOSviewer.
 Figura C. 8 - Rede de colaboração do processo de SLS e as principais biocerâmicas utilizadas nesta técnica.

C.2 – Redes de colaboração referentes aos dados brasileiros

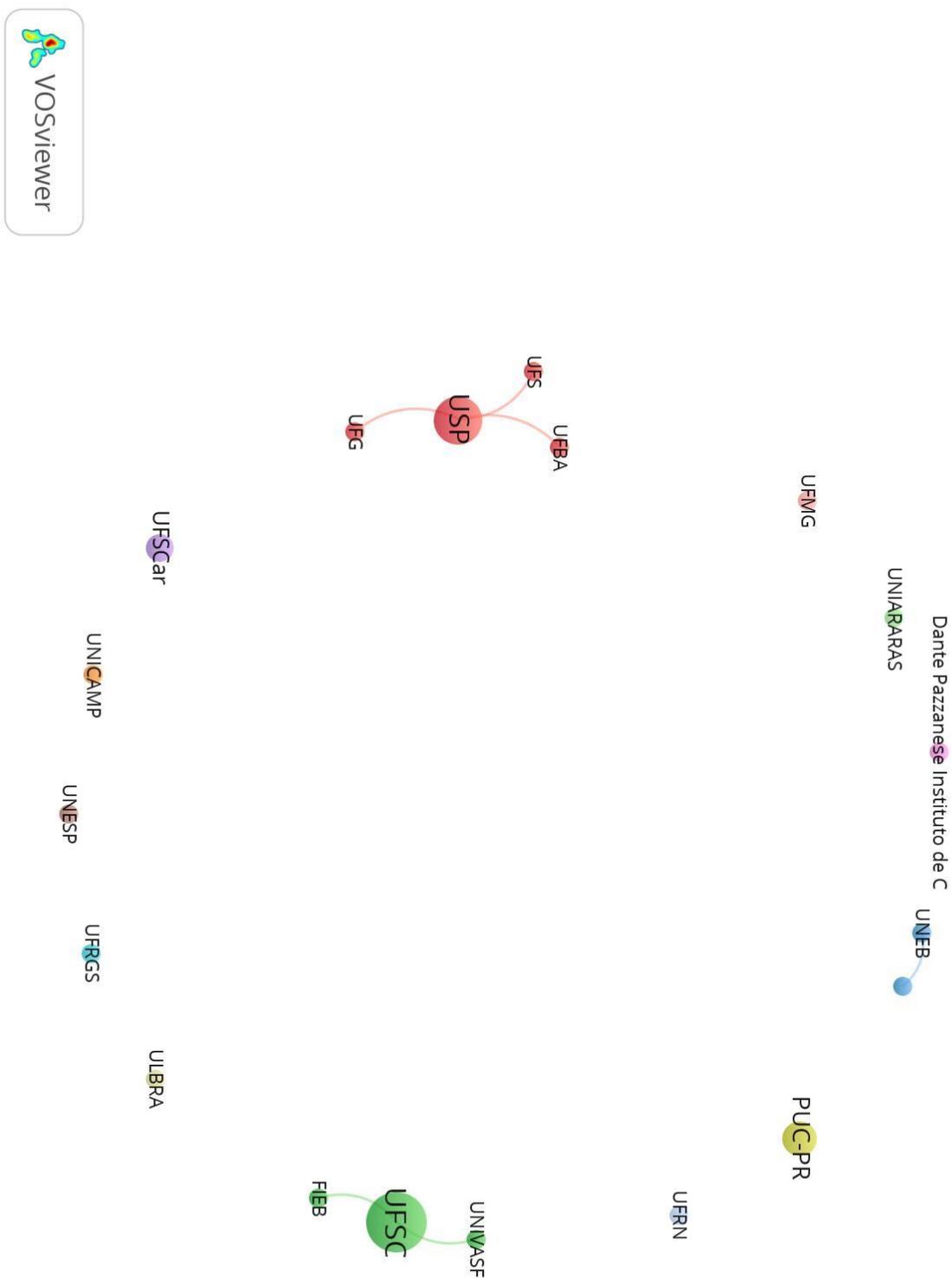


Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor no software VOSviewer.
Figura C. 9 - Rede de colaboração entre o Brasil e os países que fazem pesquisas científicas em conjunto.



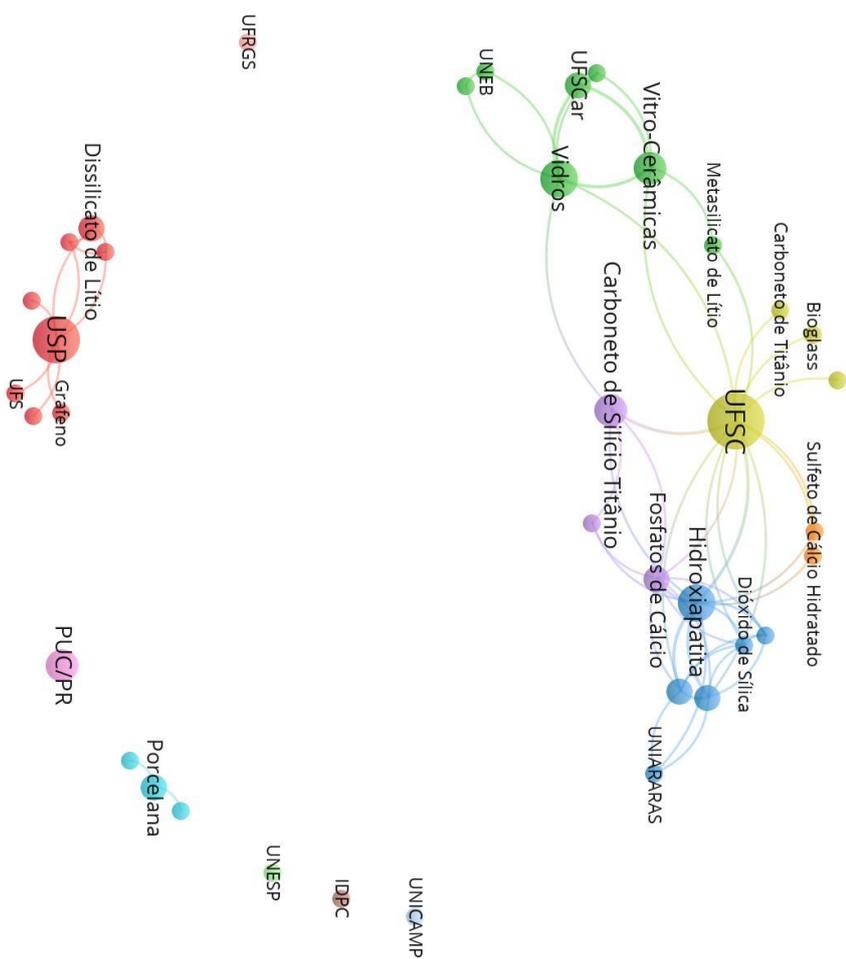
Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor no software VOSviewer.

Figura C. 10 – Parte da rede de colaboração entre o Brasil e os países que fazem pesquisas conjuntas no tópic desta dissertação, com ênfase nas biocerâmicas estudadas entre os países.

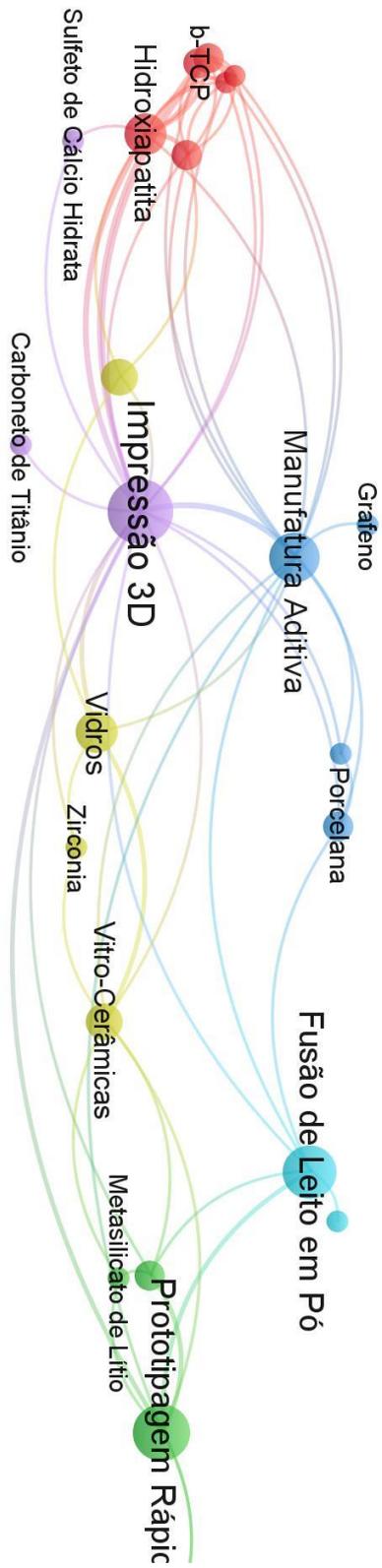


Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor no software VOSviewer.

Figura C. 11 - Panorama geral das instituições brasileiras pesquisadoras em biocerâmicas e MA, sendo que, por não possuírem pesquisas em conjunto, algumas ICTs não se conectam.

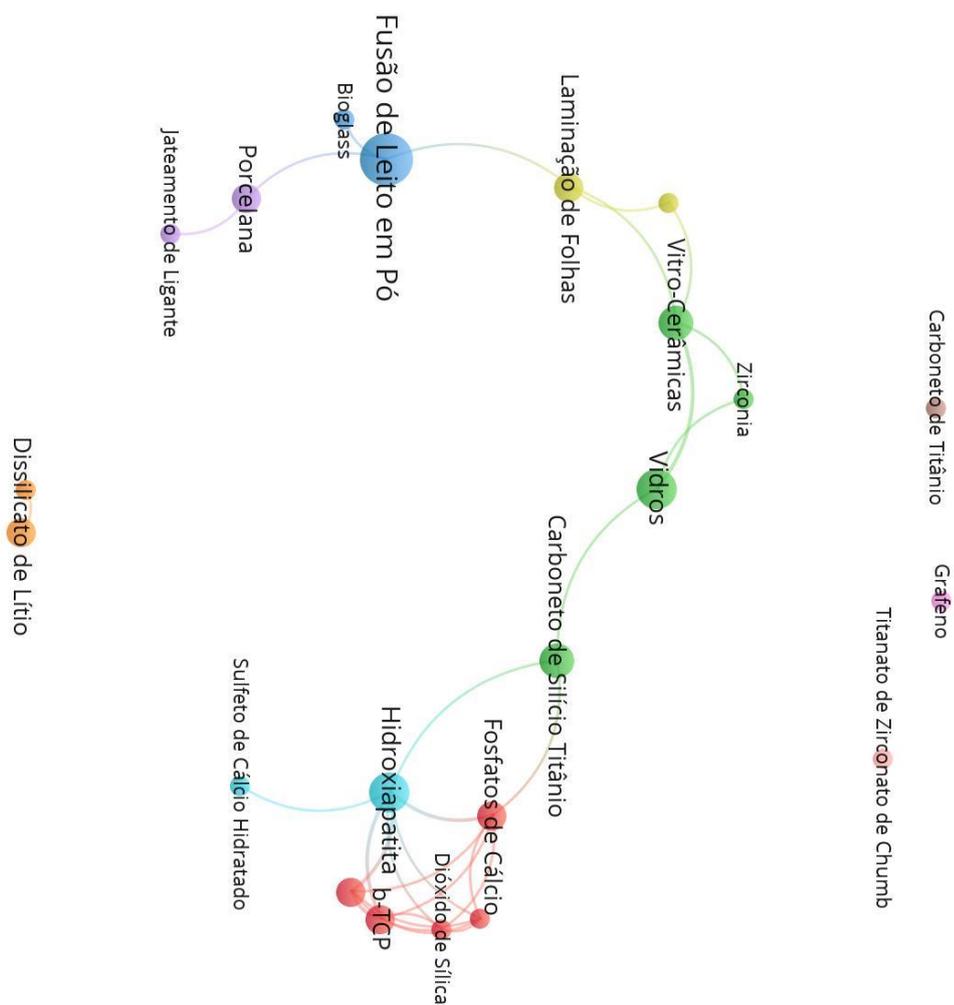


Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor no software VOSviewer.
 Figura C. 12 - Rede de colaboração entre as instituições brasileiras de pesquisa e as principais biocerâmicas estudadas por ela, extraídas por mineração de texto.



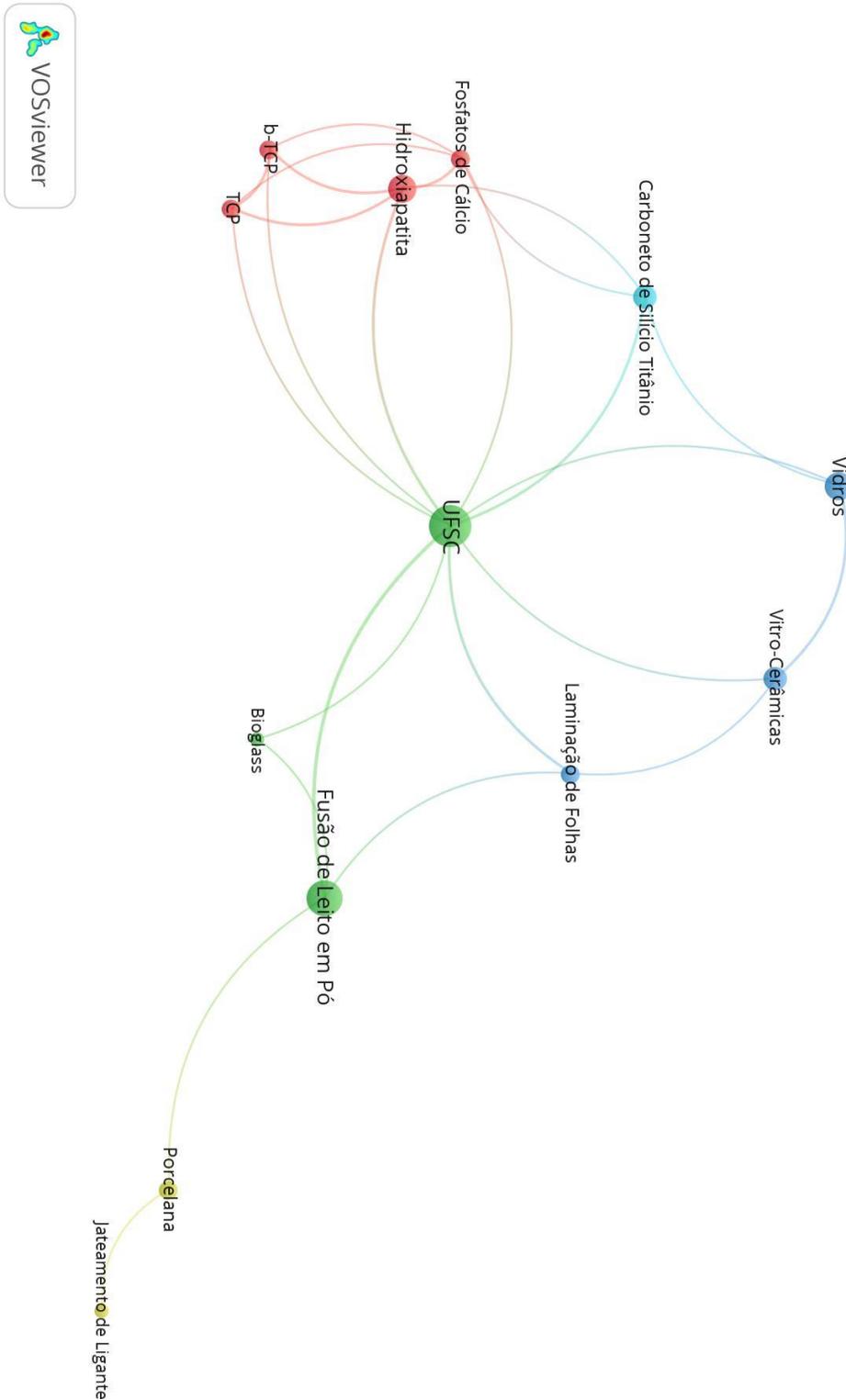
Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor no software VOSviewer

Figura C. 14 - Rede de cocorrência entre as biocerâmicas e os processos de MA no contexto do Brasil, extraídos por mineração de texto.



Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor no software VOSviewer

Figura C. 15 - Rede de coocorrência de pesquisas científicas no Brasil entre biocerâmicas e os processos de MA específicos definidos por norma.



Fonte: Web of Science. Elaborado pelo autor no software VOSviewer.

Figura C. 16 - Rede de cocorrência entre pesquisas científicas da UFSC referente a biocerâmicas e os processos de MA definidos por norma.