

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

FERNANDA FANTINATI LEBRÃO

BIOMIMETISMO E SUA APLICAÇÃO NO DESENVOLVIMENTO DE CERÂMICAS
ESTRUTURAIS – UMA REVISÃO

São Paulo
2018

Departamento de Engenharia
Metalúrgica e de Materiais da
Escola Politécnica da USP

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA POLITÉCNICA

FERNANDA FANTINATI LEBRÃO

**BIOMIMETISMO E SUA APLICAÇÃO NO DESENVOLVIMENTO DE CERÂMICAS
ESTRUTURAIS – UMA REVISÃO**

**Trabalho de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo**

**Departamento de Engenharia
Metalúrgica e de Materiais da Escola
Politécnica da USP**

**Orientador: Prof. Dr. Samuel Marcio
Toffoli**

**Departamento de Engenharia
Metalúrgica e de Materiais da
Escola Politécnica da USP**

São Paulo

2018

TF-2018

L493b

H-2018 AB

2925739

DEDALUS - Acervo - EPMT



31800009353

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

Lebrão, Fernanda Fantinati

BIOMIMETISMO E SUA APLICAÇÃO NO DESENVOLVIMENTO DE CERÂMICAS
ESTRUTURAIS – UMA REVISÃO / F. F. Lebrão – São Paulo, 2018.

58 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1.cerâmica avançada 2.biomateriais 3.biomateriais cerâmicos 4.materiais compósitos
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II.t.

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

Lebrão, Fernanda Fantinati

BIOMIMETISMO E SUA APLICAÇÃO NO DESENVOLVIMENTO DE CERÂMICAS
ESTRUTURAIS – UMA REVISÃO / F. F. Lebrão -- São Paulo, 2018.
58 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento
de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1.cerâmica avançada 2.biomateriais 3.biomateriais cerâmicos 4.materiais compósitos
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de
Materiais II.t.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Escola Politécnica por todos os anos de ensinamentos, desafios e aprendizados que contribuíram para minha formação como engenheira. Agradeço ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, seus funcionários e professores, pelos últimos anos e por toda a especialização e desenvolvimento que pude ter no campo da Engenharia de Materiais.

Agradeço aos meus amigos por todos os momentos de felicidade, de aprendizados e apoio nas horas difíceis, obrigada a todos que estiveram presente durante essa minha trajetória. Com certeza, esse meu percurso na Escola Politécnica foi uma experiência muito mais prazerosa graças a companhia de vocês.

Um agradecimento especial ao meu orientador o Professor Samuel Toffoli que aceitou me orientar e abraçou a ideia de falarmos sobre um tema nada convencional, agradeço ainda as várias conversas que tivemos durante nossos encontros.

Quero agradecer ao meu namorado, Gustavo, que me apoiou em todo esse tempo e estava comigo nas horas mais difíceis.

Por último, quero deixar registrado a minha gratidão aos meus pais e a minha avó, que sempre me apoiaram e me deram todo o suporte para que eu pudesse ingressar na Escola, incentivaram-me todo o tempo, aconselharam-me e foram duros quando foi necessário.

A Escola Politécnica foi um grande sonho que eu realizei e que agora se encerra. Que venham os próximos desafios.

Obrigada.

Foreword

I am delighted to have the opportunity to write the foreword to this book. It is a book that I have been following with great interest and admiration for some time. The author's vision and passion for the subject are evident throughout the work, and it is a pleasure to see it brought to fruition. The book is a testament to the power of the human imagination and the potential of our world. It is a book that I believe will inspire and inform a wide range of readers, from students to professionals. The author's approach is both rigorous and accessible, and the book is a valuable contribution to the field. I am proud to have the opportunity to introduce this book to you, and I hope that it will be a source of inspiration and knowledge for many years to come.

"We do not need magic to transform our world. We carry all the power we need inside ourselves already. We have the power to imagine better" – J.K. Rowling

RESUMO

A natureza é a principal inventora, projetista, arquiteta, engenheira do mundo. Com bilhões de anos de experiência, realiza pesquisas em todos os ramos da engenharia e da ciência. Seus projetos sempre inspiraram novas tecnologias, mas ela nunca foi a fonte de ideias e de novas soluções para os problemas da humanidade do ponto de vista de uma abordagem científica. O biomimetismo surge como uma nova ciência cujo objetivo é possibilitar um novo olhar para com a natureza e toda sua criação científica. É olhar, analisar, estudar e entender como as folhas conseguem produzir toda sua energia tendo como fonte a luz do sol e como os cientistas podem pegar a receita que a natureza desenvolveu para chega numa solução ótima. Como as conchas podem ser semelhantes aos materiais cerâmicos que produzimos, porém ser naturalmente resistentes e como isso pode ser transformado em tecnologia e criar uma integração entre todas as ciências. Este trabalho irá definir o que é biomimetismo, mostrar como a natureza serviu como modelo e como várias tecnologias foram desenvolvidas a partir dela. Apresentar-se-á algumas estratégias que a natureza se utiliza para desenvolver materiais resistentes e organismos complexos, são eles: crescimento e adaptação funcional, estrutura hierárquica e biomineralização. Para mostrar uma solução para a otimização de um material cerâmico, frágil em essência pode ser encontrada até numa pequena concha, será mostrada uma pesquisa de como a madrepérola oferece soluções para o desenvolvimento de cerâmicas mais fortes. Por último, três pesquisas serão apresentadas mostrando novas abordagens para esse tema.

Palavras-chave: biomimetismo biomimético, bioinspirado, cerâmica, alumina, aperfeiçoamento.

ABSTRACT

Nature is the principal inventor, designer, architect, engineer of the world. With billions of years of experience and boasting the most extensive and varied laboratory available, it conducts research in all fields of engineering and science. His designs have always inspired new technologies, but he has never been the source of ideas and new solutions to the problems of mankind from the point of view of a scientific approach. Biomimethics emerges as a new science whose purpose is to enable a new vision at nature and all its scientific creation. It is to observe, analyze, study and understand how leaves can produce all their energy from sunlight and how scientists can take the recipe that nature has developed to arrive at an optimal solution. As the shells may be similar to the ceramic materials we produce, but be naturally resistant and how this can be turned into technology and create a new integration among all science. This work will define what biomimetics is, show how nature served as a model and how various technologies were developed from it. It will be presented some strategies that nature uses to develop resistant materials and complex organisms, they are: growth and functional adaptation, hierarchical structure and biomineralization. To show a solution for the optimization of a ceramic material, fragile in essence can be found even in a small shell, will be shown a research of how nacre offers solutions for the development of tough ceramics. Finally, three surveys will be presented showing new approaches to this topic.

Keywords: biomimetic biomimetics, bioinspired, ceramics, alumina, improvement.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Esboços de Da Vinci de uma máquina de voar [2].....	14
Figura 2: Etapas da metodologia biomimética. Adaptado de [9]	16
Figura 3: Imagem de um ninho de uma ave [12].	19
Figura 4: Estrutura em aço no "Ninho de Pássaro", estádio Olímpico de Pequim [11]	20
Figura 5: Visão geral de vários grupos biológicos e suas funções Adaptado de [3]	22
Figura 6: Esquema do chip de coleta de energia solar do MIT. [16]	24
Figura 7: Célula solar inspiradas do design e mecanismo das folhas [17]	25
Figura 8: Modelo esquemático das principais funções da superfície das folhas: (a) barreira de transporte, (b) molhabilidade da superfície, (c) propriedades auto-limpantes, antiaderentes, (d) sinalização de hospedeiro patogênico, (e) propriedades ópticas, (f) propriedades mecânicas, (g) redução da temperatura superficial [19]	26
Figura 9: Representação do SLIPS [20]	28
Figura 10: Planta carnívora do tipo Nepenthes [20]	28
Figura 11: Imagem de MEV de pelos com ganchos. Imagem de Tom Mueller 2008. Disponível em * [3]	30
Figura 12: Imagem de comparação entre planta bardana, do gênero <i>Artium</i> , e a tecnologia biomimética. [22]	30
Figura 13: Fotografia de uma teia de aranha, mostrando a complexidade da estrutura. [24]	31
Figura 14: Escolha dos elementos base nos materiais de engenharia e biológicos. Extraído de [10]	33
Figura 15: Diagram de Ashby - Módulo de Young x Densidade [31]	40
Figura 16: Diagrama de Ashby - Resistência x Densidade [31]	41
Figura 17: Comparação da tenacidade à fratura de várias classes de materiais [34].	43
Figura 18: Madrepérola de uma concha [35]	45
Figura 19: Estrutura hierárquica (5 níveis) da madrepérola do abalone (gastropode). [37]	46
Figura 20: Ilustração da organização das diferentes estruturas. Retirado de [38].	48
Figura 21: Comparação de microestruturas Extraído de [38]	49
Figura 22: Comparação relativa da performance de materiais Extraído de [38]	51

SUMÁRIO

1	Introdução	10
2	Revisão de Literatura	12
2.1	Biomimetismo	12
2.1.1	Natureza como Modelo	16
2.1.2	Estruturas e ferramentas	18
2.1.3	Materiais e processos em biologia	20
2.2	Lições da Natureza	21
2.2.1	Conversão química de energia	23
2.2.2	Morfologia de superfícies foliares com propriedades multifuncionais	26
2.2.3	Superhidrofobicidade, autolimpante e baixa adesão	27
2.2.4	Pelos com ganchos	29
2.2.5	Teia de aranha	30
2.3	Materiais Bioinspirados	32
2.2.6	Crescimento e adaptação funcional	34
2.2.7	Estrutura hierárquica	35
2.2.8	Biomíneralização	36
3	Estudo de caso	38
3.1	Considerações Iniciais	38
3.2	Estudo de caso: Madrepérola como inspiração para o aprimoramento de cerâmicas estruturais	47
3.2.1	Imitando a natureza	47
3.2.2	Propriedades mecânicas	50
3.3	Outros estudos sobre materiais cerâmicos	52
3.3.1	Cerâmicas inspiradas geologicamente, feitas a base de água e à temperatura ambiente [43]	52
3.3.2	Uma folha sintética: O potencial biomimético do óxido de grafeno [44]	52
3.3.3	Nano revestimentos biomiméticos com propriedades mecânicas, de barreira e retardantes de chama [45]	53
4	Conclusão	54
5	Referências	55

1 Introdução

Se fosse possível reduzir a história do planeta Terra em 1 ano, os humanos apareceriam nos últimos 15 minutos. Desses 15 minutos, o progresso industrial mais recente ocorreria em 1 minuto. Apesar dessa pequena proporção, a industrialização ocorrida no último século é comparativamente maior do que a do início do desenvolvimento da humanidade. Embora a rápida taxa de industrialização tenha melhorado as condições e perspectivas de vida, também trouxe poluição e destruição ambiental, afetando a própria sobrevivência humana. Atualmente é necessário 140% dos recursos do planeta para suprir as atividades humanas [1].

Nessa tendência de industrialização, é feito um esforço contínuo na criação de novos produtos e tecnologias que possam cada vez mais melhorar a vida das pessoas. Contudo, a sobrevivência humana enfrenta um dilema físico de viver com recursos limitados. Um método interessante para lidar com esse tipo de dilema pode ser encontrado na biomimética, que usa a natureza como modelo, padrão e orientador [2]. Essa ciência vem ganhando destaque no meio científico, na busca por soluções mais inteligentes e sustentáveis.

Depois de bilhões de anos de evolução, a natureza aprendeu o que funciona, o que é apropriado e o que dura [3]. Também aprendeu a usar recursos mínimos para alcançar o máximo desempenho. Reconhecendo que essa capacidade continua significativamente à frente de muitas de nossas tecnologias, os seres humanos sempre procuraram imitar a natureza. Este campo, que também é chamado de biônica [2], atingiu níveis impressionantes que incluem reproduzir parte do processo do pensamento humano em computadores, imitando características humanas como tomar decisões e operar de forma autônoma.

A biologia oferece um excelente modelo para o desenvolvimento de ferramentas mecânicas, algoritmos computacionais, materiais eficazes, bem como novos mecanismos e tecnologia da informação. [3] Ao adaptar esses mecanismos da natureza, as abordagens científicas ajudaram os humanos a entender os fenômenos relacionados e os princípios associados, a fim de projetar novos dispositivos e melhorar sua capacidade. A estrutura baseada em

células, que compõe a maioria das criaturas biológicas, oferece a capacidade de crescer com tolerância a falhas e auto reparo, enquanto faz todas as coisas que estão caracterizando os sistemas biológicos. Portanto, as estruturas de engenharia que são feitas de várias células permitiriam o design de dispositivos e mecanismos que são impossíveis com os recursos atuais. Nanotecnologias emergentes estão permitindo cada vez mais o desenvolvimento do potencial de tais capacidades.

Dentro desse contexto, a engenharia e a ciência dos materiais se encontram fortemente presentes. Na natureza, encontra-se materiais para as mais diversas funcionalidades: ossos (estrutura, resistência), conchas (proteção), entre outras. Mas todos esses materiais foram desenvolvidos com restrições de recursos limitados e em condições que fossem favoráveis à existência da vida, e mesmo assim, a Natureza foi capaz de construir materiais altamente resistentes, flexíveis, duráveis. Estudar e replicar como isso foi feito parece uma tarefa promissora.

A cerâmica é uma das principais classes de materiais e possuem as mais diversas aplicações. Muitos de seus principais compostos são amplamente encontrados na natureza. Então, olhar como a Natureza tem trabalhado com esses compostos pode levar ao desenvolvimento de novos materiais cerâmicos.

Assim, nos próximos tópicos deste trabalho serão apresentados o conceito e a origem dessa ciência, onde ela vem sendo estudada e aplicada, bem como algumas lições tiradas da natureza já utilizadas de modo comercial e como o futuro da ciência dos materiais, principalmente os materiais estruturais, pode estar intimamente relacionado com a biomimética.

O objetivo desse trabalho é promover um novo olhar sobre o desenvolvimento de novas tecnologias. É promover a integração do conhecimento e das ciências e engenharia.

2 Revisão de Literatura

2.1 Biomimetismo

Em 1960, o médico Jack Steele da Força Aérea dos Estados Unidos da América (EUA) cunhou o termo “Biônico”, que significava a “Ciência dos sistemas em que o funcionamento é baseado nos sistemas naturais, ou que apresentam características específicas dos sistemas naturais, ou ainda que sejam análogos a estes” [4], em uma reunião na Base da Força Aérea Wright-Peterson em Dayton, Ohio [2,5]. Alguns anos mais tarde, em 1969, o neurofisiologista Otto H. Schmitt usou o termo “biomimético” em seu trabalho de doutorado intitulado “Some interesting and useful biomimetic transforms”, no qual tentou desenvolver um aparelho que imitasse a resposta elétrica de um nervo. Uma década mais tarde, em 1974, essa palavra teve sua primeira aparição pública no Dicionário Webster, com a seguinte definição [6]:

“The study of the formation, structure, or function of biologically produced substances and materials (as enzymes or silk) and biological mechanisms and processes (as protein synthesis or photosynthesis) especially for the purpose of synthesizing similar products by artificial mechanisms which mimic natural ones.”

Apesar de parecer um assunto novo, é um campo que vem sendo abordado há várias décadas e é cada vez mais relacionado à ciência e engenharia, mas também muito utilizado na arquitetura e no design. O termo em si é derivado do grego “bios” (vida) e “mimesis” (imitar). Esta nova ciência representa os estudos e a imitação dos métodos, projetos e processos da natureza.

Embora algumas configurações e designs básicos da natureza possam ser copiados, há muitos conceitos, quiçá a maioria deles, utilizados como fonte de inspiração na resolução de problemas a partir de recursos desenvolvidos pelo homem. Apesar do biomimetismo, ou biomimética, significar ao pé da letra “imitar a vida” sua real definição não se limita a junção dessas duas palavras, abrange um conceito mais amplo de buscar na natureza, soluções e inspirações para a resolução de problemas das mais distintas áreas [2]. O processo de evolução

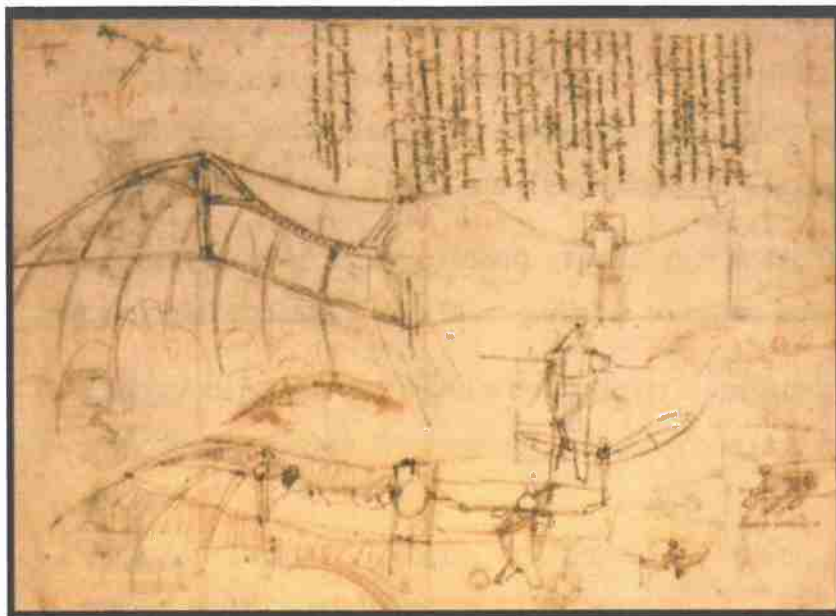
permitiu que a natureza “experimentasse” variadas soluções para seus desafios e selecionasse aquelas mais bem-sucedidas. Organismos que a natureza criou, capazes de sobreviver, não são necessariamente ótimos para seu desempenho técnico [2]. Efetivamente, tudo o que eles precisam fazer é sobreviver por tempo suficiente para se reproduzir. Além disso, o processo envolveu o dimensionamento de escalas, criando soluções na escala nano (para bactérias e vírus) até na escala macro (seres humanos e o que nos rodeia).

Os organismos arquivam as informações evoluídas e acumuladas codificando-as nos genes das espécies e passando as informações de geração em geração [6]. Assim, através da natureza da evolução, ou biologia, é possível perceber os princípios da física, química, engenharia mecânica, ciência dos materiais, mobilidade, controle, sensores e muitos outros campos que reconhecemos como ciência e engenharia.

Mas se engana quem acha que o biomimetismo (termo a ser usado nesse trabalho) é uma ciência nova, que começou a existir a partir da metade do século passado [2]. O conceito de olhar para a natureza e tentar reproduzi-la de alguma forma é tão antigo quanto o próprio homem.

Na Idade das Pedras, os homens primitivos esculpam rochas e ossos em forma de dentes para utilizar como armas ou instrumentos para comer. Na mitologia grega, Dedalus, um notável arquiteto e inventor, fez asas para seu filho Ícaro moldadas à forma das asas dos pássaros para fugir da ilha de Creta. Leonardo da Vinci (1452 – 1519) mantinha rascunhos (Figura 1) da anatomia e sistemas de voo dos pássaros que o levou a projetar uma “máquina de voar” inspirada em um pássaro [2,6]. No Oriente, o General Yi Sun-Sin construiu um navio de guerra modelado a partir do casco de uma tartaruga [2]. E no Brasil, Santos Dumont chegou a estudar a estrutura dos pássaros para construir seus aviões [7]

Figura 1: Esboços de Da Vinci de uma máquina de voar [2]



Fonte: SANTOS (2009)

Em 1997, Janine Benyus [8] – engenheira florestal de formação – sistematizou os conceitos que circundavam a ciência do biomimetismo e publicou seu livro intitulado “*Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*” (“Biomimética: Inovação Inspirada pela Natureza”, em tradução livre), maior publicação dessa área. Em sua obra, Janine consolidou descobertas de uma ampla variedade de disciplinas, transitando da engenharia até áreas comerciais. No decorrer do livro ela mostra de maneira diversificada e com abordagem simples uma série de propostas que, efetivamente, ilustram as tendências e os princípios correntes da investigação biomimética [5]

Benyus define a existência de três princípios (3Ms) que descrevem este novo campo de estudo:

1. A Natureza como **Modelo**: na qual se estuda os modelos e processos existentes na natureza com o propósito de imitar ou se inspirar neles a fim de resolver os problemas humanos. Um exemplo é uma célula de energia solar que é inspirada numa folha.
2. A Natureza como **Medida**: Nesse princípio o padrão ecológico de “correção” e ajuste é aplicado nas invenções. Após quase 4 bilhões de

anos de evolução, a natureza aprendeu o que funciona, o que é apropriado, o que dura.

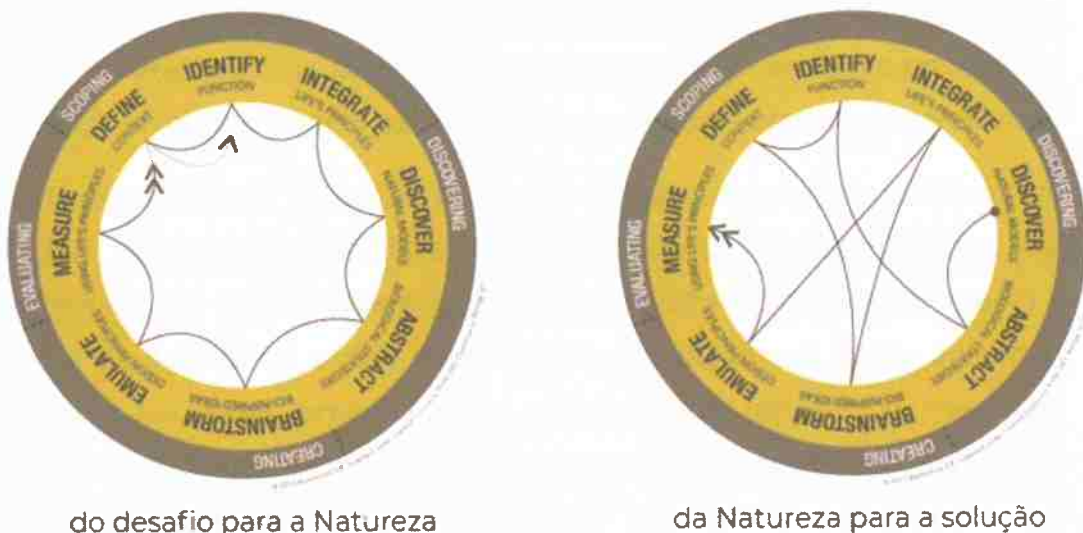
3. A Natureza como **Mentor**: O biomimetismo vem como uma forma de observar e valorizar a natureza. Tirar valor dela e aprender com ela.[8]

E para poder acessar o “open source” que a Natureza oferece a metodologia proposta para o biomimetismo se divide em 4 etapas:

- Escopo: definição da função e do contexto a ser executado
- Descoberta: Busca de modelos naturais que se encaixam nesse escopo
- Criação: Desenvolvimento do projeto a partir dos princípios encontrados na natureza
- Avaliação: utilização dos *Princípios da Vida* na identificação de oportunidades de melhoria

Essas etapas não são sequenciais, podendo-se alterar sua sequência. Isso vai depender de onde se parte: se é a partir de um desafio, então volta-se para Natureza em busca de uma solução, olhando para ela como uma grande fonte de inspiração; se é a partir de uma solução que existe na Natureza, então volta-se para o nosso mundo e tenta-se observar onde esse tipo de solução se encaixaria. Aeronaves surgiram da vontade do homem em voar como os pássaros.

Figura 3: Etapas da metodologia biomimética. Adaptado de [9]



Fonte: Biomimética e Sustentabilidade (2018)

2.1.1 Natureza como Modelo

A natureza tem um enorme conjunto de invenções que passaram no duro teste de praticidade e durabilidade no ambiente em mudança. Para aproveitar-se ao máximo as invenções da natureza, é fundamental fazer-se a ponte entre os campos da biologia e da engenharia. Esse esforço de ligação pode ser uma chave para transformar as invenções da natureza em recursos, ferramentas e mecanismos de engenharia. Para abordar a natureza em termos de engenharia, é necessário classificar as capacidades biológicas num espectro de categorias tecnológicas usando uma estrutura de cima para baixo ou vice-versa [6].

Pode-se tomar cada aspecto das características identificadas biologicamente e buscar uma analogia em termos de uma tecnologia artificial. O surgimento de nanotecnologias, microprocessadores altamente capacitados e rápidos em miniatura, armazenamento de energia eficiente, memória de acesso compacta e rápida, comunicação sem fio e muitos outros, estão tornando a imitação de recursos naturais significativamente mais viável. Uma razão para isso é que tanto as estruturas naturais quanto as artificiais dependem das mesmas unidades fundamentais de átomos e moléculas [5].

Há muitas características que podem identificar um mecanismo biomimético e uma importante é a capacidade de operar de forma autônoma em ambientes complexos, sendo adaptável a mudanças não planejadas e imprevisíveis e executando tarefas multifuncionais [10]. Fazer um mecanismo com essas características aumenta drasticamente as capacidades possíveis e pode atingir níveis que podem ser tão bons ou superiores aos humanos/animais.

Isso pode incluir operar 24 horas por dia sem interrupção ou operar em condições que representem riscos para a saúde dos seres humanos. Os benefícios de tais capacidades podem incluir a realização de monitoramento e vigilância de segurança, busca e salvamento, operação sob riscos químicos, biológicos e nucleares, tomando ações corretivas e de advertência imediatas, assim como muitas outras que são limitadas apenas pela nossa imaginação [3]. Algumas das capacidades biologicamente inspiradas que podem ser implementadas em mecanismos eficazes incluem:

- Materiais e estruturas multifuncionais;
- Materiais e configurações de alta resistência;
- Martelar sem propagação reversa de vibração como o pica-pau faz;
- Nanoestruturas que imitam sistemas completos, como o vírus e as bactérias, ou que criam estruturas baseadas em células;
- Robôs que operam cooperativamente e possuem comportamento biomimético, bem como expressão corporal para comunicação;
- Reproduzir o desempenho aerodinâmico da libélula e do beija-flor;
- Sensores e feedback baseados em biomimética;
- Ferramentas e algoritmos de otimização;
- Mobilidade multifuncional que combina caminhar, rastejar, escalar (árvores, penhascos ou paredes), nadar, voar, agarrar, cavar e manipular objetos;
- Locomoção autônoma.

2.1.2 Estruturas e ferramentas

Criaturas biológicas podem construir formas e estruturas surpreendentes usando materiais em seus arredores ou materiais que eles produzem. As formas e estruturas produzidas dentro de uma espécie são cópias muito próximas. Eles também são bastante robustos e suportam a função exigida da estrutura durante a duração necessária [5,10]. Tais estruturas incluem o ninho das aves e o favo de mel das abelhas.

Muitas vezes o tamanho de uma estrutura pode ser significativamente maior do que as espécies que a construíram, como é o caso da teia de aranha. Uma criatura que tem uma habilidade de engenharia altamente impressionante é o castor, que constrói represas como seu habitat em córregos. Outras estruturas interessantes incluem túneis subterrâneos construídos por roedores e ratos.

Aves fazem seu ninho de galhos e outros materiais que são fixados a vários objetos estáveis, como árvores, e seus ninhos são duráveis durante a época de nidificação da ave [Figura 3]. Muitos ninhos são hemisféricos na área onde os ovos são colocados. Pode-se imaginar como as aves têm a capacidade de projetar e produzir a forma e o tamanho correto que atendam aos requisitos de permitir que os ovos depositados eclodam e os filhotes cresçam até que deixem o ninho. O tamanho do ninho é responsável pelo número potencial de ovos e filhotes, em termos de espaço necessário.

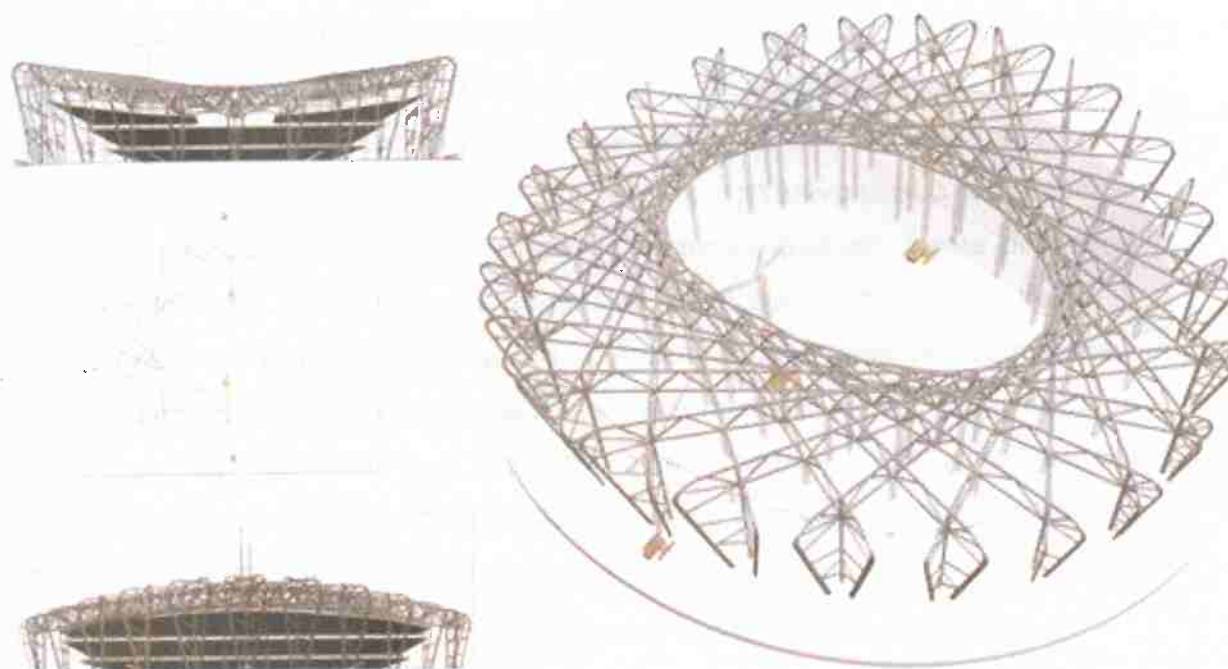
A Figura 4 mostra um dos estádios dos Jogos Olímpicos de 2008, em Pequim, sua construção foi inspirada na arquitetura dos ninhos como , de modo a otimizar custo e espaço para atletas e torcidas. [11]

Figura 5: Imagem de um ninho de uma ave [12].



Fonte: BONIFANT (2018)

Figura 7: Estrutura em aço no "Ninho de Pássaro", estádio Olímpico de Pequim [11]



Fonte: CHAN (2018)

2.1.3 *Materiais e processos em biologia*

O corpo é um laboratório químico que processa produtos químicos adquiridos da natureza e os transforma em energia, materiais de construção, resíduos e várias estruturas multifuncionais [5,13]. Os materiais naturais têm sido bem reconhecidos pelos humanos como fontes de alimento, vestuário, conforto e muitos outros, como pele, couro, mel, cera, leite e seda. Embora algumas das criaturas e insetos que produzem materiais sejam relativamente pequenos, eles podem produzir quantidades de materiais que são suficientes para satisfazer o consumo humano em uma escala de produção em massa (por exemplo, mel, seda e lã).

O uso de materiais naturais pode ser rastreado milhares de anos atrás. A seda, que é produzida para proteger o casulo do bicho da seda, tem grandes propriedades que incluem força e durabilidade. Essas vantagens são bem reconhecidas pelos seres humanos e a necessidade de produzi-las em qualquer quantidade desejada levou à produção de versões e imitações artificiais [2,8].

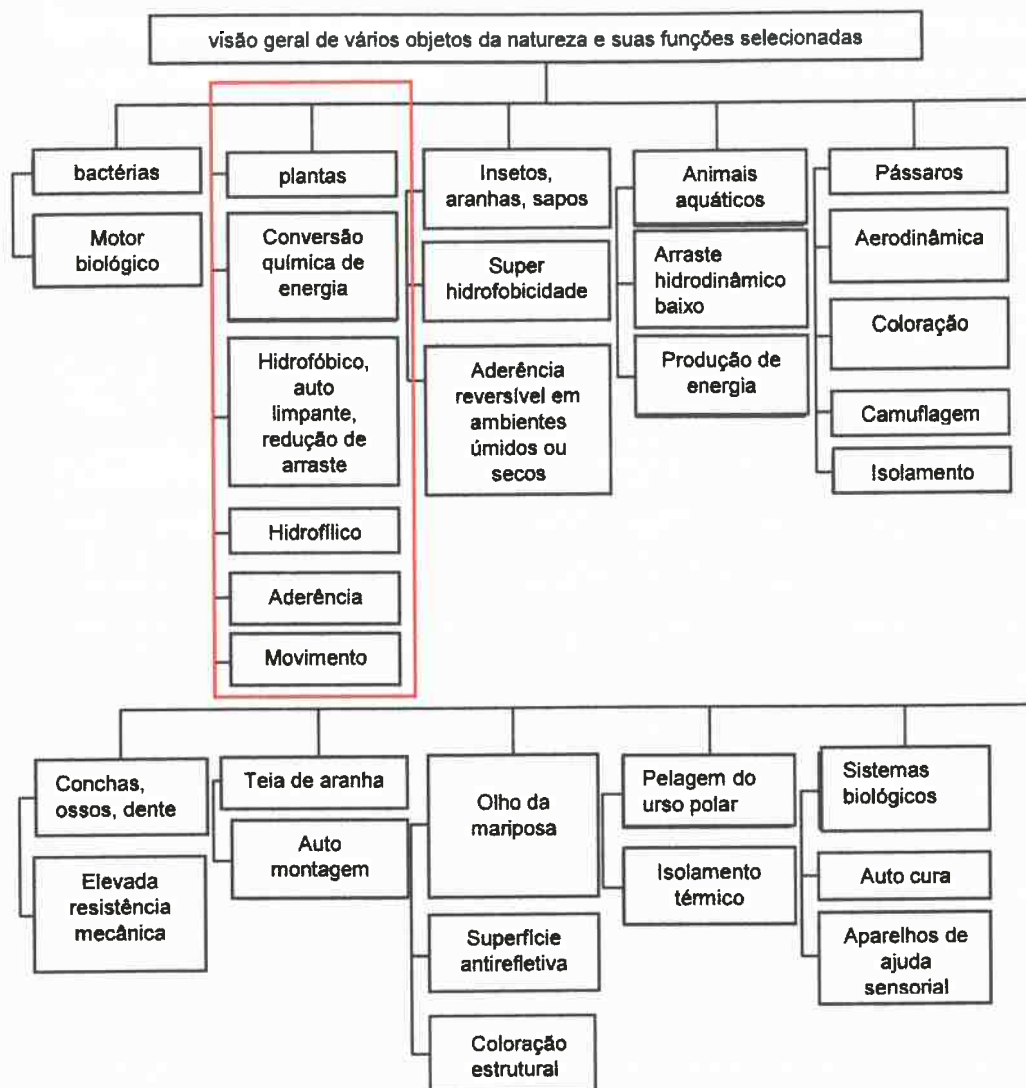
Algumas das capacidades fascinantes dos materiais naturais incluem auto cura, auto replicação, reconfigurabilidade, equilíbrio químico e multifuncionalidade. Muitos materiais feitos pelo homem são processados por aquecimento e pressurização, e isso contrasta com a natureza, que sempre usa as condições ambientais. Materiais como osso, colágeno ou seda são feitos dentro do corpo do organismo sem o tratamento agressivo usado para fabricar nossos materiais [13,14]. A fabricação de materiais biologicamente derivados produz mínimo desperdício e nenhuma poluição, onde o resultado é biodegradável e é reciclado por natureza. Aprender a processar esses materiais pode melhorar nossas escolhas de materiais e melhorar nossa capacidade de criar materiais recicláveis que possam proteger melhor o meio ambiente. Há também estudos que estão melhorando próteses, que incluem quadris, dentes, suporte estrutural dos ossos e outros.

2.2 Lições da Natureza

Há duas outras maneiras de identificar soluções: com um problema a priori, sendo o meio natural a fonte de inspiração para a sua resolução ou ainda partindo de uma descoberta da natureza e criando uma tecnologia, desenvolvendo um processo a partir disso.

Na natureza há diversos seres que apresentam propriedades e funções que são de interesse comercial e é interessante salientar que de um mesmo grupo biológico pode-se extrair diversos aprendizados, como também um mesmo aprendizado/princípio pode se apresentar de várias formas em seres diferentes. A Figura 10 mostra alguns grupos de seres/sistemas naturais e algumas das lições que podem ser extraídas. [3]

Figura 9: Visão geral de vários grupos biológicos e suas funções Adaptado de [3]



Fonte: BHUSHAN (2017)

As propriedades dos materiais e superfícies biológicas resultam de uma interação complexa entre a morfologia da superfície e as propriedades físicas e químicas. Dentre os vários mecanismos existentes na natureza, vários deles possuem elevado interesse comercial e vêm sendo estudados e aplicados em tecnologias, tais como superhidrofobicidade, propriedades autolimpantes, alta adesão, adesão reversível, sustentação aerodinâmica, materiais e fibras com alta resistência mecânica, propriedade antirreflexo, coloração estrutural, isolamento térmico entre tantas outras. [6,7]

Dentre os grupos apresentados na Figura 10, o das plantas exemplificará tecnologias comerciais desenvolvidas a partir de estruturas, processos, mecanismos de alguns seres biológicos.

Nos próximos itens (2.1.1 – 2.2.5) serão apresentados casos práticos de tecnologias desenvolvidas tendo como fonte de inspiração elementos da natureza. O propósito é poder ilustrar o potencial que o biomimetismo apresenta e quão vasto pode ser sua aplicabilidade.

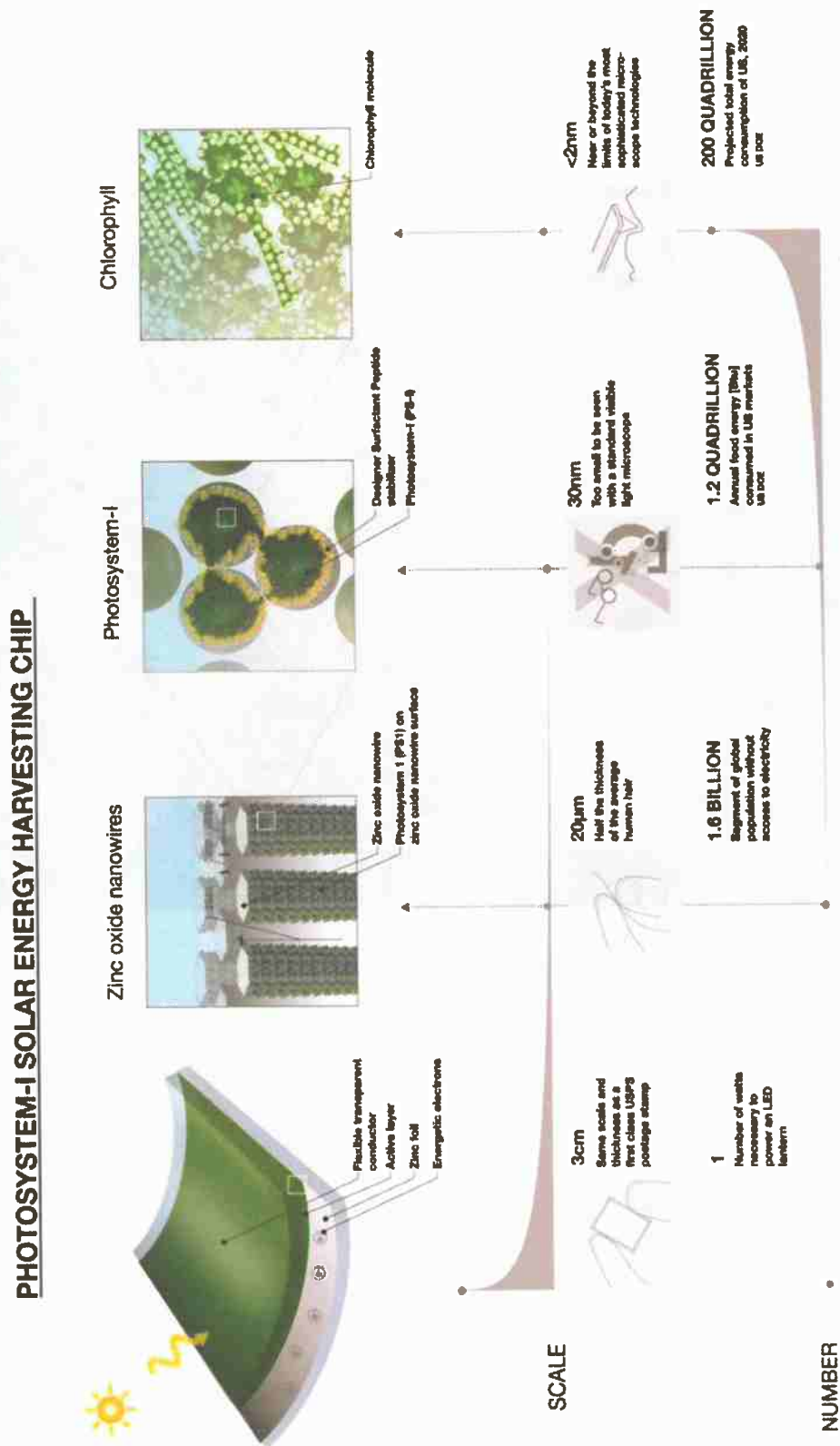
2.2.1 Conversão química de energia

A fotossíntese é um processo que utiliza a energia solar para fornecer energia às plantas. Realizada por moléculas de clorofila (pigmento verde) dispostas dentro das células das plantas, a energia solar é convertida em energia química. Essa tecnologia foi explorada no desenvolvimento de células solares feitas de polímeros sensibilizados por corante por várias indústrias [15].

A equipe do pesquisador Andreas Mershin do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) juntamente com o bioquímico Barry Bruce da *University of Tennessee* desenvolveram um processo de extrair moléculas funcionais da grama de jardins comuns, de canteiros e até de resíduos da agricultura. O processo envolve basicamente a mistura desse material orgânico com um peptídeo estabilizante que resulta na extração de uma proteína, principal responsável pela fotossíntese. Essa mistura reveste uma pequena matriz de nanofios de óxido de zinco intercaladas com dióxido de titânio e através de fotossíntese gera eletricidade¹. [16] A Figura 12: Esquema do chip de coleta de energia solar do MIT esquematiza as células desenvolvidas por Andreas e sua equipe.

¹ Para mais informações sobre essa pesquisa, leia o artigo "Self-assembled photosystem-I biophotovoltaics on nanostructured TiO₂ and ZnO" publicado na revista Nature

Figura 11: Esquema do chip de coleta de energia solar do MIT. [16]



Fonte: JOHNSON (2016)

No Japão, uma parceria entre a Mitsubishi e o *Japan's National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)* desenvolveram uma célula solar com filme orgânico flexível, que podem ser aplicados em paredes ou janelas Figura 14. Não somente o conceito, mas o design também foi inspirado folhas.

Figura 13: Célula solar inspiradas do design e mecanismo das folhas [17]



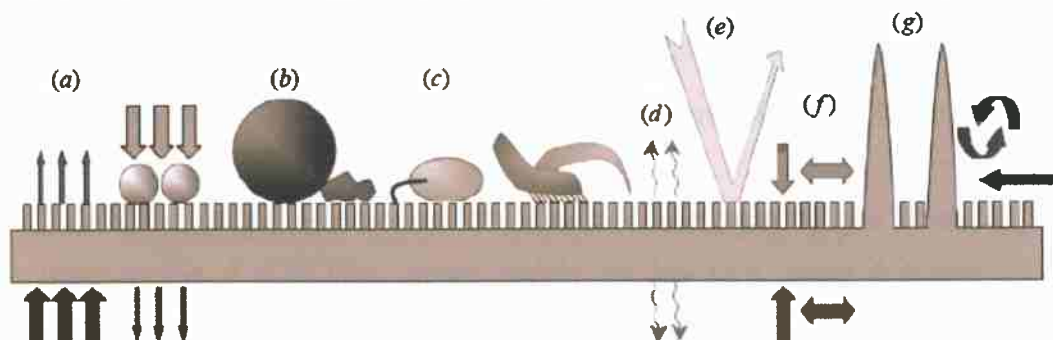
Fonte: KANOU (2017)

2.2.2 Morfologia de superfícies foliares com propriedades multifuncionais

A estrutura e morfologia da superfície das folhas das plantas apresenta propriedades multifuncionais. A camada mais externa, a cutícula, pode proporcionar propriedades hidrofílicas ou hidrofóbicas, a depender da necessidade da espécie. A cutícula também promove estabilidade e proteção e desempenha um importante papel na interação com insetos e microrganismos [18]. Em alguns casos, protege as plantas contra sobreaquecimento.

As micro e nanoestruturas das superfícies das plantas têm grande influência em seus atributos como interfaces. A Figura 8 esquematiza a grande diversidade de estruturas superficiais existentes nas plantas. Hoje, a biodiversidade vegetal contém aproximadamente 270.000 espécies diferentes, mas cálculos recentes sugerem que a maioria das espécies na Terra ainda não foi descrita e não será, por causa das altas taxas de extinção de espécies [19].

Figura 15: Modelo esquemático das principais funções da superfície das folhas: (a) barreira de transporte, (b) molhabilidade da superfície, (c) propriedades auto-limpantes, antiaderentes, (d) sinalização de hospedeiro patogênico, (e) propriedades ópticas, (f) propriedades mecânicas, (g) redução da temperatura superficial [19]



Fonte: KOCH (2008)

2.2.3 Superhidrofobicidade, autolimpante e baixa adesão

As folhas de algumas espécies de plantas como as *N. nucifera* (lótus) e *C. esculenta*, são conhecidas por serem super-hidrofóbicas e autolimpantes devido à rugosidade hierárquica (microbombas superimpostas com nanoestrutura) e à presença de um revestimento hidrofóbico. Superfícies super-hidrofóbicas e autolimpantes induzidas por rugosidade são de interesse em diversas aplicações, incluindo janelas de autolimpeza e tintas exteriores para prédios, barcos, navios e aeronaves, utensílios, telhas, tecidos, painéis solares e aplicações que requerem antiincrustação e diminuição de atrito entre superfícies [19].

Na superfície dessas folhas há diferentes níveis de escala de rugosidade. Na escala macro, tem-se papilas e na escala micro tem-se células compostas por ceras tridimensionais que são sobrepostas àquelas da escala macro, criando, assim, uma estrutura hierárquica. Além disso, essas rugosidades podem apresentar diferentes morfologias [19].

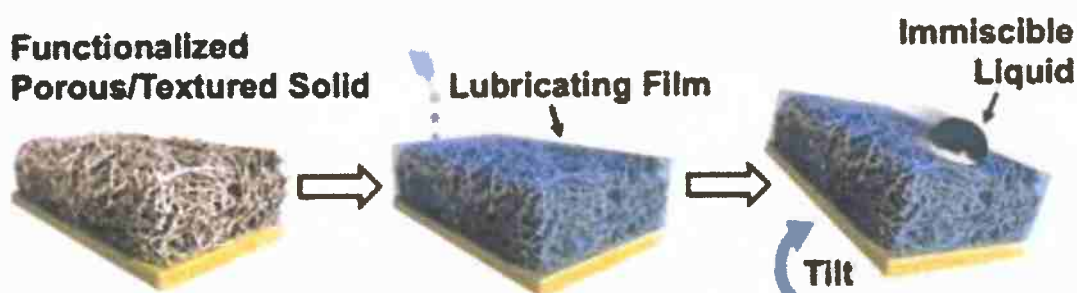
Esse tipo de estrutura representa uma das maneiras de aumentar a propriedade hidrofóbica de uma superfície, aumentando sua rugosidade. Assim, a hidrofobicidade induzida pela aspereza tornou-se objeto de extensas investigações. Esse mesmo princípio pode ser estendido para o desenvolvimento de superfícies superoleofóbicas (que repelem líquidos de baixa tensão superficial).

Esta tecnologia está sendo usada para desenvolver vários produtos. Um dos mais atuais é o SLIPS, desenvolvido no *Harvard Wyss Institute* SLIPS (*Slippery liquid-infused porous surface(s)*) Figura 19 [20] é uma superfície sintética “escorregadia” com a incrível habilidade de repelir os mais variados tipos de líquidos e que pode ter diversas implicações tecnológicas, podendo ser aplicada desde dispositivos médicos até para o transporte de combustível.

Esse tipo de tecnologia de superfície foi desenvolvido primeiramente a partir das folhas de lótus. Contudo, apesar de anos de estudo, esse tipo de superfície encontrava restrições de aplicação tais como o limite para oleofobicidade, falha sobre pressão, incapacidade de regeneração e elevado custo de produção [5,18].

Surgiu então a necessidade de uma nova tecnologia que superasse esses desafios. Isso levou ao desenvolvimento dessa nova tecnologia, uma superfície porosa com um excepcional poder repelente, inspirada na família de plantas carnívoras *Nepenthes* (Figura 20). Seu conceito é diferente da antecessora, pois utiliza-se de substratos nano/microestruturados para aprisionar no lugar o fluido [20].

Figura 18: Representação do SLIPS [20]



Fonte: Wyss Institute website (2018)

Figura 17: Planta carnívora do tipo *Nepenthes* [20]



Fonte: Wyss Institute website (2018)

2.2.4 Pelos com ganchos

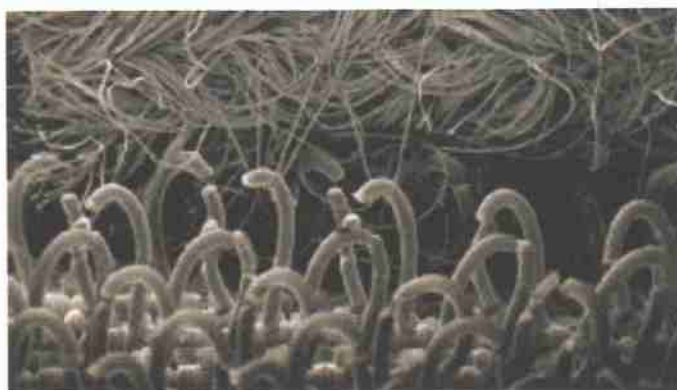
Muitas superfícies de plantas possuem pelos (também conhecidos como tricomas). Eles são encontrados nas superfícies aéreas da maioria das plantas de flores, algumas coníferas e musgos [6]. As estruturas desses pelos são frequentemente complexas e apresentam funções variadas. Muitas plantas de habitats secos mostram uma densa cobertura de pelos mortos preenchidos com ar para refletir a luz visível, o que faz a superfície parecer branca. Eles podem afetar a perda de água e a molhabilidade das superfícies. Também podem funcionar como uma âncora para dispersão de sementes por animais ou vento [3,6,23].

Dessa estrutura surgiu uma das tecnologias biomiméticas mais conhecidas, o "velcro"². Criado em 1948 pelo engenheiro suíço George de Mestral após estudar como pequenos pedaços de uma planta do gênero *Artium* tinham ficado grudados em sua roupa, ilustrado pela Figura 23. Pequenos ganchos recobriam as sementes, permitindo-as ficarem presas na roupa. A palavra Velcro® veio da junção das palavras francesas "*velour*" (veludo) e "*crochet*" (gancho)[21].

Essa tecnologia pode ser considerada um case de sucesso, ilustrando bem que as melhores soluções podem ser encontradas nas coisas mais simples. Segundo o site da marca, essa tecnologia é utilizada desde a agricultura à limpeza industrial, protegendo placas de kevlar em vestuário militar EUA e até mesmo fixar o todo o gramado em um vestuário de futebol. [24]

² Velcro® é o nome de uma marca criada por George de Mestral, o produto é um objeto fixador de gancho e argola, como a própria empresa define

Figura 21: Imagem de MEV de pelos com ganchos. Imagem de Tom Mueller 2008. Disponível em [3]



Fonte: BHUSHAN (2017)

Figura 22: Imagem de comparação entre planta bardana, do gênero *Artium*, e a tecnologia biomimética. [22]



Fonte: GUNTHER (2016)

2.2.5 Teia de aranha

Saindo um pouco do grupo das plantas. As aranhas produzem uma variedade de proteínas, entre as quais estão as grandes ampolas de seda. Essas proteínas produzem as fibras de seda para a construção da teia. As aranhas possuem um suprimento suficiente de matéria-prima para sua seda atravessar grandes distâncias [3,6,23].

A teia de aranha (Figura 26) é uma estrutura construída com uma fibra unidimensional. A fibra é muito forte e contínua e é insolúvel em água. A teia

pode abrigar uma quantidade significativa de gotículas de água sem se desmembrar e é resistente à chuva, vento e luz solar [3]. A seda da aranha é três vezes mais forte que o aço, com uma resistência à tração de aproximadamente 1,2 GPa [23]. Algumas sedas de aranha têm alta rigidez com um módulo de elasticidade de aproximadamente 10 GPa, enquanto outras são elastoméricas com um módulo de aproximadamente 1 GPa e uma extensão para ruptura de 200%. A combinação de força e extensibilidade é principalmente derivada dos domínios de planos-beta cristalinos e hélices flexíveis dentro da cadeia polipeptídica, conferindo uma resistência que é maior que o osso, Kevlar e aço de alta resistência [3,24]. A teia é projetada para capturar insetos (alimento para a aranha) que cruzam a rede e ficam presos à sua viscosidade e estrutura complexa.

Figura 25: Fotografia de uma teia de aranha, mostrando a complexidade da *estrutura*. [24]



Fonte: MACKENZIE (2018)

Embora as propriedades mecânicas da fibra da teia sejam notáveis, também é interessante como uma aranha cria uma teia bidimensional a partir de sua fibra de seda. Krink & Vollrath [23] analisaram o comportamento de construção de teias de aranha usando um modelo computacional que construía teias artificiais com uma simulação baseada em regras. Eles descobriram que as características da rede, como as distâncias em espiral, excentricidades e localização do cubo

vertical, foram precisamente simuladas com o modelo. Mais tarde, eles propuseram um "robô aranha virtual" que constrói redes virtuais, que imitam perfeitamente a arquitetura visual de teias reais da aranha *Araneus diadematus*.

Eles sugeriram que a aranha de jardim usa regras de decisão de construção que são estritamente locais e baseadas nas interações com encadeamentos previamente posicionados para gerar arquitetura global. Isso pode ser interessante para a modelagem da auto-montagem biológica de material complexo a partir das regras locais para a estrutura geral que é adaptável às condições externas.

2.3 Materiais Bioinspirados

O desenvolvimento tecnológico da humanidade baseou-se em seus estágios iniciais na manipulação dos materiais naturais, tais como ossos, madeiras e conchas. Com o avanço da história, esses materiais foram sendo lentamente substituídos por compostos sintéticos que ofereciam melhor desempenho. Os períodos da civilização foram assinalados pelos tipos de materiais mais usados – Idade da Pedra, Idade do Bronze, Idade do Ferro, Idade do Plástico [8] e, diriam alguns, a Idade do Silício, que corresponde ao período atual, mostrando como um material pode mudar todo o desenvolvimento de uma civilização [25].

Hoje, cientistas e engenheiros continuam fascinados pelas qualidades distintivas das arquiteturas elegantes e complexas das estruturas naturais, que podem ser leves e oferecer combinações de propriedades mecânicas que frequentemente superam àquelas desenvolvidas pelo ser humano, em ordens de grandeza.

As estratégias de projeto de materiais biológicos não são imediatamente aplicáveis ao projeto de novos materiais de engenharia, uma vez que existem algumas diferenças notáveis entre as estratégias comuns em engenharia e aquelas usadas pela natureza. A primeira grande diferença está na abrangência de escolha dos elementos, que é muito maior para o engenheiro (Figura 28). Elementos como ferro, cromo e níquel são muito raros em tecidos biológicos e

certamente não são usados na forma metálica, como seria o caso do aço. O ferro é encontrado nos glóbulos vermelhos, por exemplo, como um íon ligado à hemoglobina da proteína e sua função certamente não é mecânica, mas sim para se ligar ao oxigênio.

Figura 27: Escolha dos elementos base nos materiais de engenharia e biológicos. Extraído de [10]

biological material		engineering material	
Elementos naturais dominantes: C, N, O, Ca, P, S, Si...		Ampla variedade de elementos: Fe, Cr, Ni, Al, Si, C, N, O,	
Crescimento por controle biológico, auto montagem		Fabricação a partir de fundidos, pós, soluções, etc	
Estruturação hierárquica em todos os níveis de escala		Formação (da peça) e microestrutura (do material)	
Adaptação da forma e da estrutura segundo a função		Seleção de materiais conforme função	
Modelagem e remodelagem: capacidade de adaptação às condições do ambiente		Design seguro (considerando possíveis cargas máximas, bem como fadiga)	
Cura capacidade de se regenerar			

Fonte: CREMALDI (2018)

A maioria dos materiais estruturais encontrados na natureza são polímeros ou compósitos de polímeros e partículas inorgânicas. Tais materiais geralmente não seriam a primeira escolha de um engenheiro para construir estruturas mecânicas fortes e de longa duração. No entanto, a natureza os usa para construir árvores e esqueletos.

A segunda grande diferença é a maneira como os materiais são feitos. Enquanto o engenheiro seleciona um material para fabricar uma peça de acordo com um projeto exato, a natureza segue o caminho oposto e elabora tanto o

material, quanto todo o organismo usando os princípios da automontagem (controlada biologicamente). Isso fornece controle sobre a estrutura do material em todos os níveis hierárquicos e é certamente uma chave para o uso bem-sucedido de polímeros e compósitos como materiais estruturais.

O grande desafio dos materiais a serem desenvolvidos é a combinação de propriedades mecânicas (rigidez, resistência, tenacidade, baixa densidade), formatos complexos e que sejam viáveis do ponto de vista comercial.

A investigação cuidadosa de um sistema biológico que serve de modelo é necessária para a pesquisa de materiais biomiméticos.

2.2.6 Crescimento e adaptação funcional

O crescimento é um processo que pode ser influenciado pelas condições externas, incluindo temperatura, carga mecânica e fornecimento de luz, água ou nutrição. Um organismo vivo deve necessariamente possuir a capacidade de adaptação a necessidades externas, enquanto possíveis influências externas em um sistema técnico devem ser tipicamente antecipadas em seu projeto. Este aspecto da adaptação da função é particularmente fascinante para o cientista de materiais, uma vez que várias soluções não descobertas da natureza podem servir como fontes de inspiração. [8]

Diferentes estratégias na concepção de um material resultam dos dois paradigmas de "crescimento" e "fabricação". No caso de materiais de engenharia, uma peça de máquina é projetada e, em seguida, o material é selecionado de acordo com o conhecimento e experiência em relação aos requisitos funcionais, levando em consideração possíveis mudanças nesses requisitos durante o serviço (ex. cargas típicas ou máximas) e fadiga (e outras questões vitalícias) do material [25]. Em qualquer caso, a estratégia é estática, já que o design é feito no começo e deve satisfazer todas as necessidades durante a vida útil.

O fato de que os materiais naturais crescem em vez de serem fabricados leva à possibilidade de uma estratégia dinâmica: não é o projeto exato do órgão

que é armazenado nos genes, mas sim uma receita para construí-lo. Isso significa que o resultado é obtido por um algoritmo. A vantagem dessa abordagem é que ela permite flexibilidade em todos os níveis [10]. Primeiro, permite a adaptação à função, durante o seu desenvolvimento. Por exemplo, um ramo crescendo na direção do vento pode crescer de forma diferente do que na direção oposta, sem qualquer alteração no código genético. Segundo, permite o crescimento de materiais hierárquicos, onde a microestrutura em cada posição da peça é adaptada às necessidades locais [18]. Isto está ligado à ideia de robustez: a natureza desenvolveu estruturas que são capazes de sobreviver/ suportar/ adaptar-se a uma vasta distinção de ambientes, enquanto os materiais feitos pelo homem são geralmente menos flexíveis e adaptáveis em sua utilização.

O crescimento adaptativo também foi analisado no livro de Mattheck e Kubler [26], mais especificamente sobre árvores, com o objetivo específico de extrair princípios úteis de engenharia da observação de estruturas naturais. Adaptar a forma (de uma parte inteira ou parcial, como um ramo ou uma vértebra) é o primeiro aspecto da adaptação funcional.

Uma segunda possibilidade, que se relaciona mais diretamente à ciência dos materiais, é a adaptação funcional da microestrutura do próprio material (como a madeira do ramo ou o osso da vértebra). Essa necessidade dupla de otimização da forma da peça e da microestrutura do material é bem conhecida por qualquer problema de engenharia. No entanto, em materiais naturais, a forma e a microestrutura tornam-se intimamente relacionadas devido à sua origem comum, que é o crescimento do organismo.

2.2.7 Estrutura hierárquica

Estruturação hierárquica é uma das consequências do processo de crescimento dos organismos. Exemplos de materiais biológicos hierárquicos são ossos, árvores, conchas marinhas, seda de aranha, os sistemas de fixação de lagartixas, superfícies superhidrofóbicas microestruturas ópticas, exoesqueleto de artrópodes ou o esqueleto de esponjas de vidro. A estruturação hierárquica permite a construção de órgãos grandes e complexos com base em blocos de

construção muito menores, muitas vezes muito semelhantes [25]. Exemplos de tais blocos de construção são fibrilas de colágeno no osso que têm unidades com algumas centenas de nanômetros de espessura e podem ser montadas numa variedade de ossos com funções muito diferentes.

A estruturação hierárquica permite a adaptação e a otimização do material em cada nível de escala para proporcionar um excelente desempenho. Por exemplo, a tenacidade do osso é devido à ação combinada de elementos estruturais nanométricos e micrométricos.

Claramente, a estruturação hierárquica fornece uma grande oportunidade para a síntese de materiais bioinspirados e a adaptação de propriedades para funções específicas. Materiais funcionalmente classificados são exemplos de materiais com estrutura hierárquica. Novas funções podem ser obtidas apenas pela estruturação de um determinado material, em vez de escolher um novo material que forneça a função desejada [18,25]. Um exemplo para essa estratégia são materiais compostos por hierarquia distintas que são onipresentes na natureza. Eles apresentam estruturas lamelares, como em conchas marinhas ou espículas de vidro, ou estruturas fibrosas, tais como no osso ou madeira. Estas estruturas carregam muitas semelhanças com laminados de fibra de vidro e cerâmica feitos pelo homem e é altamente notável que estratégias totalmente diferentes convergiram em soluções similares [25].

Por um tempo, este tópico foi abordado no campo de pesquisa da biomineralização. Materiais híbridos hierárquicos também podem fornecer movimento e mobilidade. Músculos e tecidos conjuntivos são integrados para formar um complexo sistema, que possui função motora e estrutural ao mesmo tempo. Isso pode inspirar os cientistas de materiais a inventar novos conceitos para materiais biomiméticos.

2.2.8 Biomineralização

Todos os materiais duros em animais (incluindo nos seres humanos) são mineralizados a partir de um número limitado de componentes inorgânicos - carbonato de cálcio, sílica e fosfato de cálcio são os mais comuns. Para construir materiais duros, os organismos vivos aproveitam a biomineralização, um

processo no qual células dedicadas depositam minerais em uma matriz polimérica para fortalecer ou endurecer.

Isso mostra que a mineralização biomimética poderia ser, em princípio, um processo eficaz para a construção de materiais sintéticos. No entanto, os resultados relatados até agora são decepcionantes porque as técnicas são lentas e apenas capazes de produzir amostras de tamanho micrométrico com propriedades mecânicas que ficam aquém das de suas contrapartes naturais [13]. Apesar disso, o processo de mineralização tem sido utilizado para o crescimento de partículas, cápsulas e filmes com controle da morfologia mineral, tamanho e até mesmo da fase cristalina [26].

A mineralização de um andaime orgânico para criar um material tridimensional (3D) prático é particularmente desafiadora. Exige uma combinação da química correta do molde (para a formação de minerais) com um processo adequado que reproduza o papel das células. O primeiro é geralmente alcançado pela criação de estruturas orgânicas com sítios de ligação a íons que promovem a nucleação heterogênea. Numerosas estratégias têm sido usadas, desde o uso de polímeros naturais - alguns dos quais são conhecidos por regular a mineralização em organismos [27]. A nucleação mineral requer supersaturação iônica, que pode ser alcançada, por exemplo, através de uma mudança controlada e homogênea no pH da solução na qual o andaime é imerso. No entanto, as células geralmente promovem a mineralização localizada usando processos, como a secreção de vesículas, que são difíceis de replicar em laboratório [28]. Além disso, embora muito trabalho tenha se concentrado no controle do crescimento mineral e na estrutura em nano escala, técnicas de fabricação que usam a biomineralização para fabricar compósitos complexos com características que variam de escala ainda estão longe de ser prático.

Uma abordagem intrigante para a formação de estruturas complexas com várias hierarquias de organização é a combinação de crescimento mineral controlado e subsequente automontagem de partículas seguindo estímulos externos. Nesta abordagem, partículas responsivas inteligentes são preparadas através da funcionalização usando nanopartículas inorgânicas ou moléculas orgânicas. Estímulos externos podem então ser usados para controlar a

montagem das partículas funcionalizadas ou sua distribuição dentro de um compósito. Por exemplo, demonstrou-se como a funcionalização com moléculas orgânicas pode ser usada para promover o reconhecimento e a automontagem, de modo a construir estruturas ordenadas [26,28]. Partículas Janus - partículas que exibem química diferente em lados opostos de sua superfície - podem ser usadas para obter arranjos hierárquicos complexos [29].

Progridir da montagem de artigos em nanoescala e microescala para fazer um material estrutural prático ainda representa um grande desafio, embora tenha havido alguns avanços significativos. Por exemplo, campos magnéticos podem ser usados para controlar a distribuição de um reforço magnético em um polímero. Usando campos magnéticos em plaquetas cerâmicas funcionalizadas com nanopartículas magnéticas em sua superfície, compósitos com arranjos complexos dessas plaquetas dentro de uma matriz orgânica não foram feitos apenas com dimensões práticas, mas também manipulados para alcançar uma resposta mecânica desejada. Também foi possível criar estruturas macroscópicas usando partículas que podem ser montadas em emulsões [30]. Em alguns casos, esta montagem foi reversível funcionalizando as partículas com polímeros responsivos ao pH. No entanto, a medida em que é possível imitar as estruturas naturais usando essas técnicas ainda é uma questão de debate.

3 Estudo de caso

Nesta seção será apresentado um caso de como o biomimetismo pode ser uma ferramenta para o desenvolvimento de cerâmicas estruturais, contextualizando, inicialmente, a importância das cerâmicas, o porquê do biomimetismo ser uma escolha válida e por fim a análise do caso em si, mostrando a pesquisa.

3.1 Considerações Iniciais

A importância da ciência dos materiais vem se tornando cada vez mais relevante na busca para um futuro mais sustentável. Em particular o desenvolvimento de materiais de alta performance que conseguem dar suporte

a novas tecnologias mais eficientes em área estratégicas como conversão e armazenamento de energia, construção civil, meios de transporte e transferência de dados se faz cada vez mais necessário.

Para que esse objetivo seja alcançado, esses novos materiais devem oferecer uma combinação de propriedades (resistência ao desgaste, tenacidade, baixa densidade, inércia química, entre outras) melhores que os já existentes e serem fabricados em formas complexas e produzidos em larga escala e baixo custo.

Dentre as diferentes classes de materiais, as cerâmicas exibem maior rigidez (Figura 31) (elevado Módulo de Young) e resistência (Figura 32) [31]. Isso ocorre devido à forte ligação direcional entre seus átomos que apresentam alta estabilidade térmica. Dessa forma, essa combinação de propriedades faz com que as cerâmicas sejam a melhor escolha para aplicações na qual se exige alta tensão e alta temperatura. No entanto, as ligações iônico-covalentes limitam os mecanismos de plasticidade mais comuns e, portanto, impedem qualquer comportamento dúctil. Essa falta de plasticidade é muitas vezes a principal limitação para o uso de materiais cerâmicos, resultando frequentemente em falhas catastróficas e imprevisíveis [32], o que limita muito seu leque de aplicações. Cerâmicas resistentes a danos são, portanto, uma grande demanda.

Figura 295: Diagrama de Ashby – Módulo de Young x Densidade

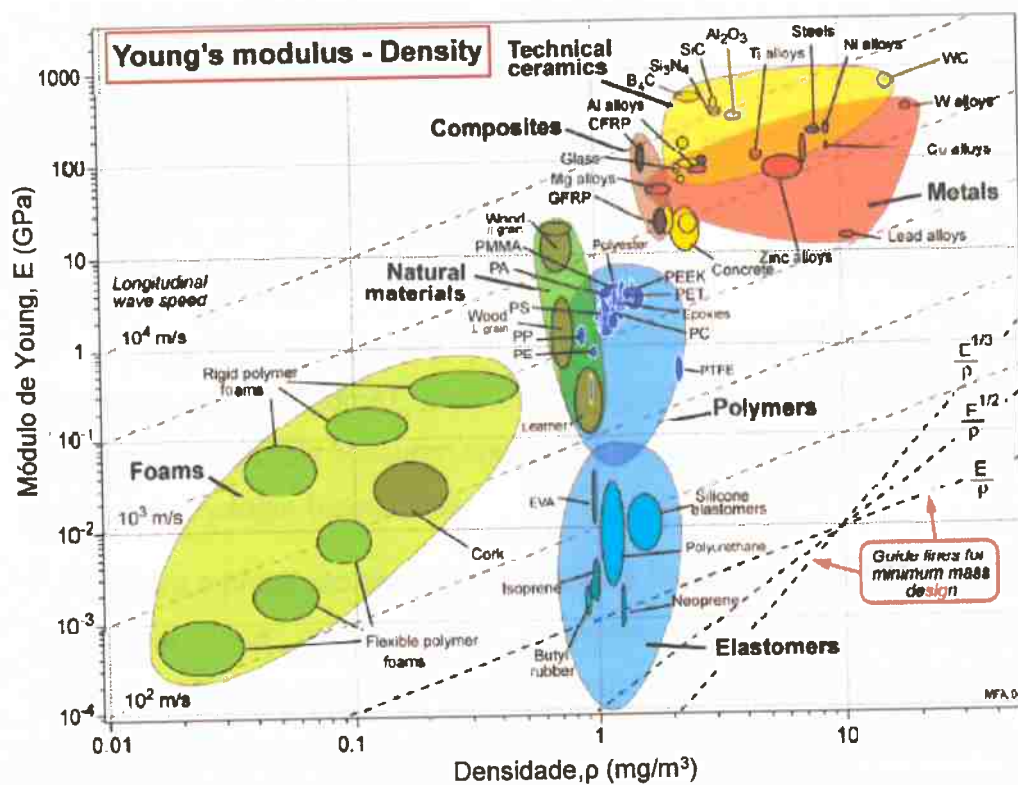
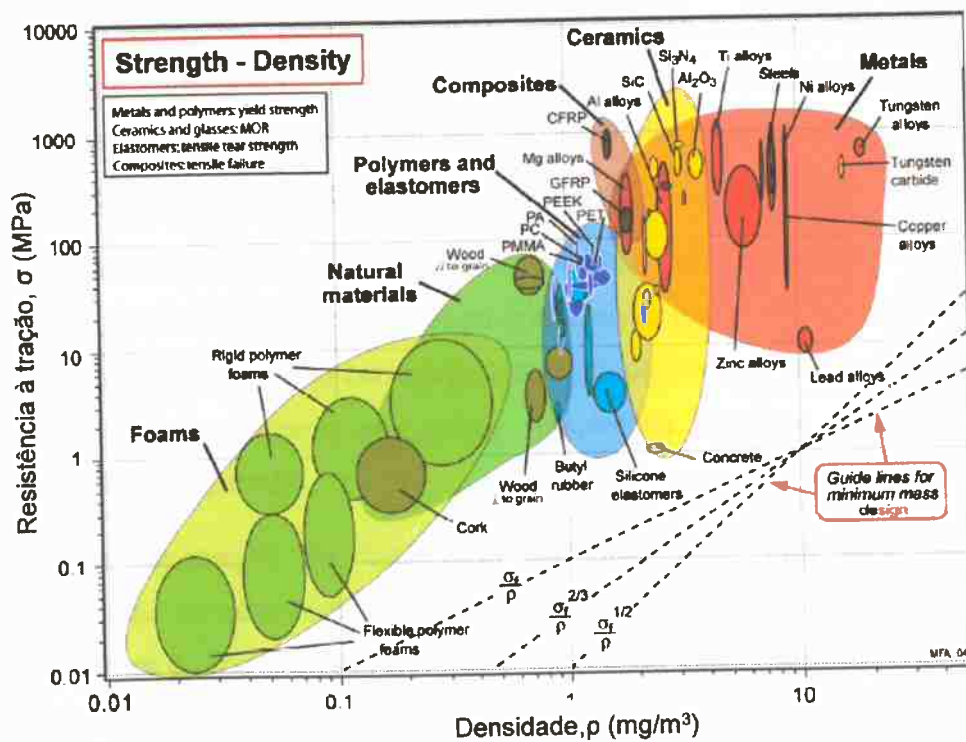


Figura 30: Diagrama de Ashby – Resistência x Densidade [31]



As cerâmicas podem ser agrupadas com base em diferentes critérios, considerando composição química, microestrutura ou aplicação por exemplo. Do ponto de vista da aplicação, costuma-se dividir as cerâmicas entre cerâmicas tradicionais e cerâmicas avançadas [33,34].

- Cerâmicas tradicionais: porcelana, louça sanitária, tijolos, azulejos, etc.
- Cerâmicas avançadas: cerâmicas eletrônicas (isolantes, capacitores); cerâmicas ópticas (vidros), cerâmicas magnéticas e cerâmicas estruturais. As cerâmicas estruturais possuem aplicações em engenharia mecânica, engenharia química, tecnologia biomédicas.

Para o propósito desse trabalho, será levado em consideração cerâmicas estruturais, uma vez que são materiais que podem ser utilizados em componentes com restrições severas de projetos. Elas geralmente são feitos de pós sintéticos que podem ser adaptados para aplicações específicas e novos métodos de fabricação [33]. Essas cerâmicas possuem propriedades mais avançadas do que os outros tipos.

Alguns exemplos que se encaixam nessa categoria são: alumina (Al_2O_3) que são utilizadas como cadinhos, placas para fornos, componentes para máquinas industriais; cerâmicas de nitreto de silício (SiC) usadas como ferramentas de corte e refratários de cordierita-mulita usados por seu bom comportamento ao choque térmico. [33,34]

A alumina é o material cerâmico fino mais conhecido e comumente utilizado. Possui a mesma estrutura cristalina do rubi e da safira [34]. Tem sido utilizado há décadas em componentes elétricos por seu alto isolamento elétrico e amplamente utilizado em partes mecânicas por sua alta resistência ao desgaste e à corrosão.

A fabricação de cerâmicas de alumina é feita pelo processo de sinterização do pó do óxido a elevadas temperaturas ($>1300\text{ }^\circ\text{C}$). O processo de manufatura é uma grande fonte de formação de defeitos que vão determinar os limites de força da alumina em serviço [33].

A sinterização é um processo que consiste na densificação de compactados porosos sob aquecimento através do transporte das partículas em escala atômica e sendo um processo termicamente ativado. A força motriz para a densificação é o excesso de energia superficial presente no pó a ser compactado [33,34]. Com o decorrer da sinterização há um decréscimo da área superficial e diminuição da energia livre de superfície pela eliminação de interfaces sólido-vapor com surgimento simultâneo de interfaces sólido-sólido.

Durante o processo de sinterização o compactado poroso experimenta uma mudança na forma dos poros, uma retração volumétrica caracterizadas pela eliminação da fase porosa e a ocorrência de crescimento de grão das partículas em contato entre si.

À temperatura ambiente, tanto as cerâmicas cristalinas como as não-cristalinas quase sempre fraturam antes que qualquer deformação plástica possa ocorrer em resposta à aplicação de uma carga de tração. O processo de fratura frágil consiste na formação e na propagação de trincas através da seção reta do material em uma direção perpendicular à carga aplicada [34]. O crescimento da trinca em cerâmicas cristalinas se dá transgranularmente e ao longo de planos cristalográficos específicos, planos de elevada densidade atômica.[33]

As resistências à fratura medidas para os materiais cerâmicos são substancialmente inferiores àquelas estimadas pela teoria a partir das forças de ligação interatômicas. Isso pode ser explicado pela existência de defeitos muito pequenos onipresentes no material, os quais servem como fatores de concentração de tensões [34].

A medida da habilidade de um material cerâmico em resistir à fratura quando uma trinca está presente é especificada em termos da tenacidade à fratura (K_{Ic}) [34]. A propagação da trinca não irá ocorrer enquanto o lado direito da equação acima foi inferior à tenacidade à fratura em deformação plana do material. Os valores da tenacidade à fratura em deformação plana para os materiais cerâmicos são menores do que aqueles apresentados pelos metais;

tipicamente, eles são menores do que $10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. Os valores de K_{Ic} para vários materiais está mostrado na Figura 17.

Figura 33: Comparação da tenacidade à fratura de várias classes de materiais [34].

		$K_{Ic} \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}})$
Metals	Ferrous	
	Cast Irons	22 - 54
	High Carbon Steels	27 - 92
	Medium Carbon Steels	12 - 92
	Low Carbon Steels	41 - 82
	Low Alloy Steels	14 - 200
	Stainless Steels	62 - 280
	Non-ferrous	
	Aluminium Alloys	22 - 35
	Copper Alloys	30 - 90
	Lead Alloys	5 - 15
	Magnesium Alloys	12 - 18
	Nickel Alloys	80 - 110
	Titanium Alloys	14 - 120
	Zinc Alloys	10 - 100
Ceramics	Glasses	
	Borosilicate Glass	0.5 - 0.7
	Glass Ceramic	1.4 - 1.7
	Silica Glass	0.6 - 0.8
	Soda-Lime Glass	0.55 - 0.7
	Porous	
	Brick	1 - 2
	Concrete, typical	0.35 - 0.45
	Stone	0.7 - 1.5
	Technical	
	Alumina	3.3 - 4.8
	Aluminium Nitride	2.5 - 3.4
	Boron Carbide	2.5 - 3.5
	Silicon	0.83 - 0.94
Composites	Metal	
	Aluminium/Silicon Carbide	15 - 24
	Polymer	
	CFRP	6.1 - 88
	GFRP	7 - 23
Natural		
	Bamboo	5 - 7
	Cork	0.05 - 0.1
	Leather	3 - 5
	Wood, typical (Longitudinal)	5 - 9
	Wood, typical (Transverse)	0.5 - 0.8

Fonte: CALLISTER (2013)

A imagem mostra que para os materiais cerâmicos, a tenacidade à fratura de modo geral varia desde valores bem baixos como $0,2 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (concreto) até $12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (zircônia). Valores bem abaixo de qualquer liga metálica. Isso é um dos principais fatores limitantes em aplicações de engenharia para um material cerâmico. Contudo quando comparamos outras propriedades como dureza, ocorre o inverso.

É aqui onde organismos biológicos proporcionam uma rica fonte de inspiração para novas ideias. Por exemplo, estruturas naturais que são altamente mineralizadas e na sua grande maioria cerâmicas, como a madrepérola e o esmalte do dente, minimizam o desgaste e promovem proteção [13]. O modo como eles se estruturam e se organizam com vários níveis de orientação e variada escala de grandeza para gerarem superfícies tão duras que conseguem resistir ao desgaste/penetração e subcamadas que acomodam as deformações é o que fazem esses materiais naturais tão especiais uma vez que quando comparados com aqueles fabricados pelos humanos, que quebram catastroficamente.

Outros exemplos de estratégias evolutivas são o uso de arquiteturas altamente porosas que combinem baixa densidade e tenacidade, como os ossos esponjosos (fêmur) ou o bambu, porém eles tendem a ser mais fracos.

Dito isso, vamos pegar um desses materiais naturais e ver de que modo ele pode ser utilizado no aperfeiçoamento de materiais cerâmicos [13,14].

Para aprimorar a tenacidade de materiais cerâmicos, é utilizado o artifício de se introduzir uma fase dúctil, metálica ou polimérica, que acaba diminuindo a resistência e a dureza do material, bem como a sua estabilidade em altas temperaturas [6,13].

Um grupo de pesquisadores franceses juntamente com um laboratório da Saint-Gobain desenvolveram um material cerâmico que combina alta tenacidade, resistência e dureza e que foi inspirada num material biológico.

Sabe-se que resistência, dureza e tenacidade são geralmente propriedades mutuamente excludentes em materiais de engenharia. É possível encontrar na natureza alguns materiais que apresentam alta resistência e tenacidade, porém essas propriedades dependem de uma combinação de mecanismos que atuam em diferentes escalas e que são difíceis de replicar [34].

O exemplo mais famoso é provavelmente a madrepérola, ilustrada na Figura 36, aquela camada que reveste a parte exterior das pérolas e que também envolve algumas conchas.

Figura 35: Madrepérola de uma concha [35]

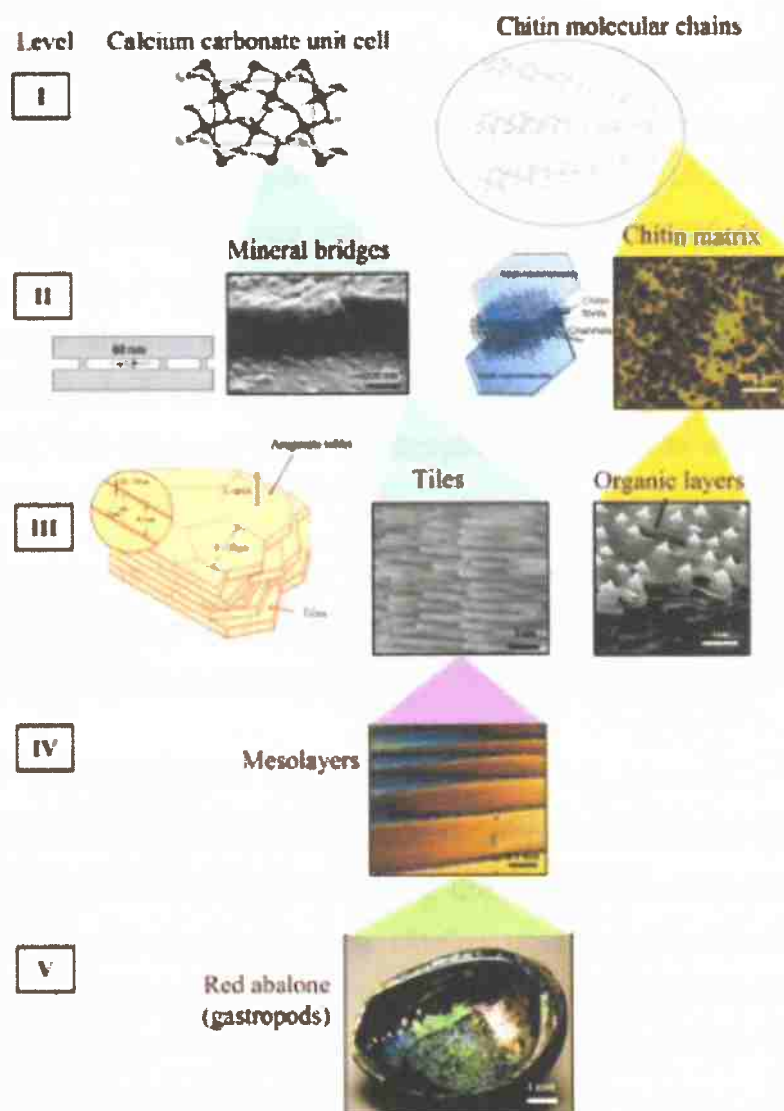


Fonte: COCKEY (2018)

A madrepérola é um material iridescente que se localiza na camada interior de alguns moluscos marinhos. É um composto natural composto principalmente por uma fase de aragonita (95% vol) organizada em planos de plaquetas poligonais unidos por uma fina película de um biopolímero (proteína). A aragonita é um mineral do grupo dos carbonatos (CaCO_3) e de caráter quebradiço (3,5 – 4 na escala Mohs). Contudo ao adicionar a aragonita com uma pequena quantidade do polímero orgânico e juntamente com uma microestrutura bem desenhada obtém-se um material de 20 – 30 vezes mais resistente e tenaz que um cristal de aragonita. A resistência da madrepérola advém de inúmeros mecanismos, que incluem a deformação viscoelástica da camada de proteínas, a ruptura de pontes minerais e o cisalhamento inelástico durante o deslizamento das plaquetas de aragonita [36]

A Figura 38 ilustra a estrutura hierárquica da madrepérola de um molusco chamado abalone. Percebe-se que é uma estrutura bem complexa em vários níveis de escala (nano – macro).

Figura 37: Estrutura hierárquica (5 níveis) da madrepérola do abalone (gastropode).
[37]



Fonte: SUN (2012)

3.2 Estudo de caso: Madrepérola como inspiração para o aprimoramento de cerâmicas estruturais

No artigo intitulado "*Strong, tough and stiff bioinspired ceramics from brittle constituents*"³[38] publicado em 2014 na *Nature Materials*, pesquisadores franceses utilizaram a madrepérola como modelo para o desenvolvimento de uma cerâmica biomimética, que combina as propriedades de alta resistência, dureza, tenacidade e estabilidade a alta temperatura. Por utilizar técnicas de processamento largamente difundidas, os pesquisadores acreditam que esse novo material poderá ser utilizado em situações que envolvam alta carga e temperaturas, com destaque para a utilização em estruturas e transporte, além de aplicações em energia.

Nos próximos tópicos será apresentado como esse novo material foi elaborado e comparado às suas propriedades mecânicas com outros materiais cerâmicos fabricados industrialmente.

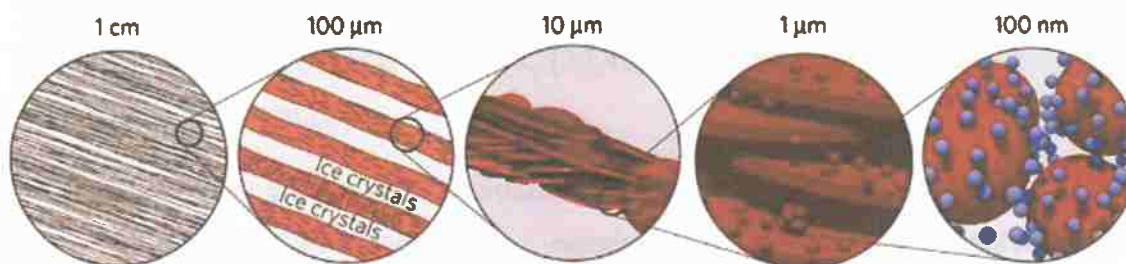
3.2.1 Imitando a natureza

O material resultante no estudo, que foi denominado pelos pesquisadores de alumina semelhante à madrepérola, é um verdadeiro sanduiche cerâmico, formado por plaquetas de alumina (Al_2O_3) unidas por uma fase vítrea e preenchidas por nanopartículas, de 20nm de diâmetro, de sílica (SiO_2) e óxido de cálcio (CaO). [38]

Para a obtenção desse material, os pesquisadores se inspiraram na estrutura organizacional da madrepérola, como comentado anteriormente, elaborando um material que tivesse cinco estruturas hierárquicas. Acompanhe a Figura , seguindo a ordem da direita para a esquerda: uma estrutura alongada formada por cristais(1 cm); uma camada alinhada e intercalada de fase vítrea e alumina (100 μm); plaquetas de alumina alinhadas (10 μm); nanopartículas de alumina (1 μm) e os precursores da fase vítrea (100 nm). [38]

³ Todas as imagens dessa seção foram retiradas do artigo apresentado

Figura 39: Ilustração da organização das diferentes estruturas. Retirado de [38].



Fonte: BOUVILLE (2014)

O processo utilizado foi o *ice-templating*, [39] utilizando o crescimento dos cristais de gelo como forças motrizes para orientar as plaquetas de alumina. Então, basicamente, quando uma suspensão é direcionalmente congelada. O crescimento de cristais de gelo ordenados induz o alinhamento local das placas de alumina. Nanopartículas de alumina e precursores da fase vítrea ficam presos entre as placas, usados como precursores da fase vítrea, são introduzidas ainda durante o estágio da sinterização. [38,39]

Para criar o material cerâmico, a suspensão congelada é finalmente sinterizada. O processo de sinterização consiste em compactar uma amostra e submetê-la a temperaturas ligeiramente menores que a sua temperatura de fusão. A sinterização é muito similar à prensagem a quente, com a exceção de que um campo elétrico é utilizado para aquecer rapidamente o molde de grafite, o nome do processo é sinterização em campo assistido, em tradução livre ("*Field-assisted sintering*"). As altas temperaturas e pressões, juntamente com fenômenos de transporte são responsáveis por criar a alterações na estrutura microscópica do material sintetizado [38].

A elevada área de superfície das nanopartículas de alumina permite a sinterização a temperaturas mais baixas do que as plaquetas. Isso faz com que as nanopartículas atuem com pontes iônicas entre as plaquetas, que não são suscetíveis a densificar por sinterização, principalmente devido ao seu grande diâmetro e espessura. Ao final do processo, obtém-se um material cerâmico de engenharia com estrutura semelhante à madrepérola, e com propriedades mecânicas muito superiores às cerâmicas comuns

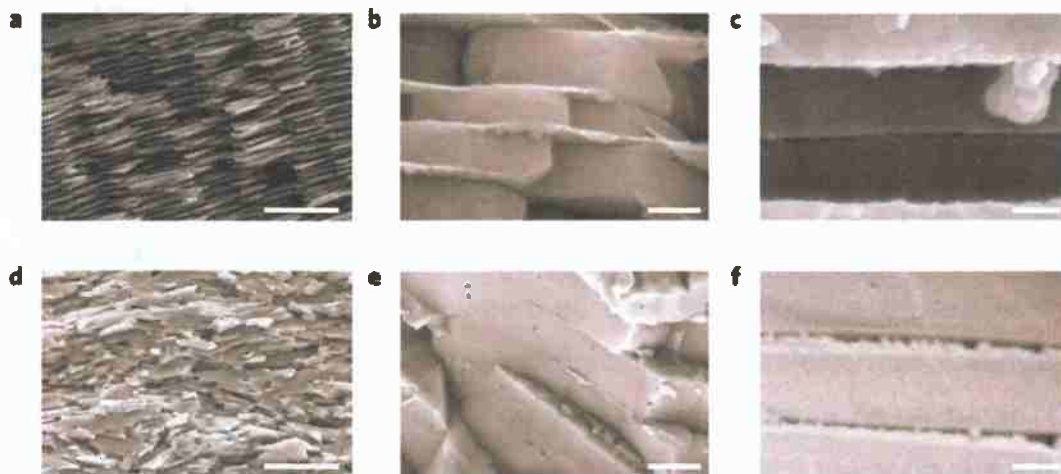
A escolha da sílica e do óxido de cálcio como precursores da fase vítrea deve-se a seus elevados ponto de fusão (a sílica pura funde a 1750°C, enquanto que o óxido de cálcio funde a 2570 °C [38,40]. Resumidamente, todo o processo consiste de três etapas:

- A preparação de uma suspensão coloidal aquosa, contendo todos os blocos de construção necessários e demais aditivos de processamento;
- Congelamento desta suspensão;
- E, finalmente, sinterização assistida por pressão a 1.500 °C.

A microestrutura final do novo material é caracterizada por um empacotamento denso de plaquetas. O processo de sinterização utilizado limitou o crescimento do grão, preservando o tamanho inicial das plaquetas.

A Figura 21 apresenta uma comparação entre as microestruturas da madrepérola (a-c) e do material desenvolvido pelos pesquisadores (d-f). Observando as interfaces entre as plaquetas (Figura -b), revela-se a presença de uma fase secundária que imita a camada orgânica da madrepérola (Figura) [38]. É simples perceber a similaridade entre as duas.

Figura 21: Comparação de microestruturas Extraído de [38]



Fonte: BOUVILLE (2014)

3.2.2 Propriedades mecânicas

Os testes realizados pelos pesquisadores mostram que o comportamento mecânico da alumina semelhante à madrepérola é inesperado para um material exclusivamente composto de constituintes cerâmicos. Eles observaram, por exemplo, que falhas progressivas ocorrem pela propagação estável de fraturas, um comportamento pouco usual para materiais puramente cerâmicos. A resistência à iniciação de fratura também é significativamente mais elevada na estrutura semelhante à madrepérola do que em alumina policristalina usual. Além disso, as propriedades do material são mantidas mesmo a temperaturas relativamente elevadas (600 ° C).

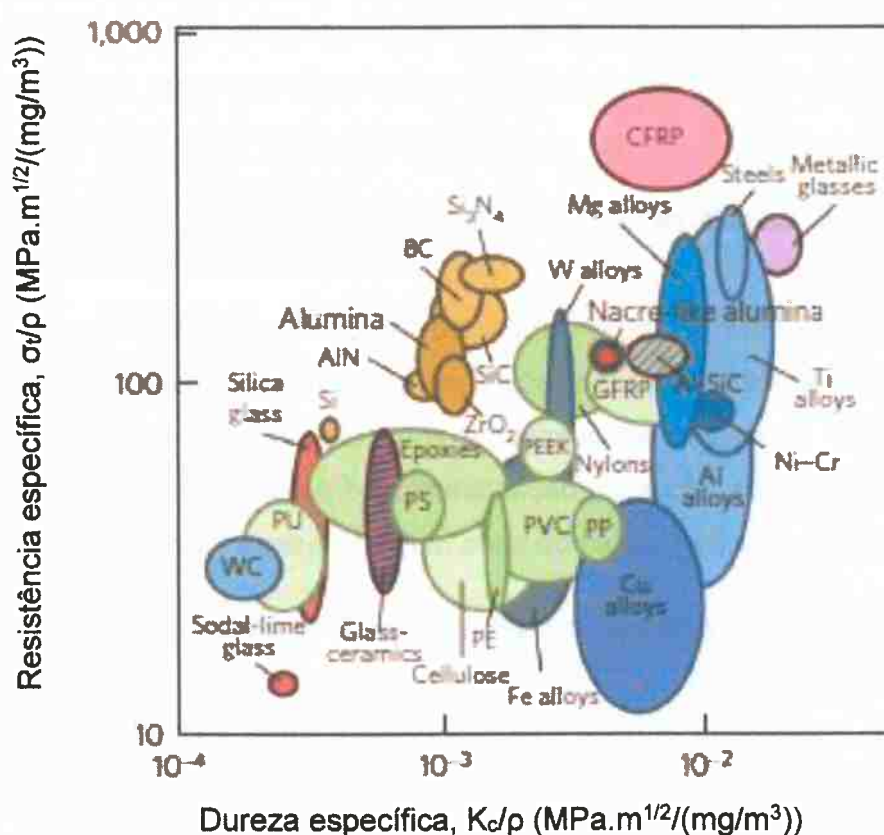
Na pesquisa, utilizou-se uma amostra policristalina de alumina para poder comparar as propriedades da alumina semelhante à madrepérola. O novo material apresentou um índice de tenacidade à fratura $K_{Ic} = 6.1 \text{ MPa.m}^{1/2}$, enquanto que a alumina de referência apresenta um $K_{Ic} = 3.5 \text{ MPa.m}^{1/2}$, um aumento de 500%. [38]. Uma pesquisa mais recente, em abril de 2018, conseguiu obter uma cerâmica biomimética com tenacidade à fratura de $K_{Ic} = 7.4 \text{ MPa.m}^{1/2}$ [41]

A alumina semelhante à madrepérola apresenta uma resistência à flexão de 470 MPa à temperatura ambiente e 420 MPa, a 600 °C, um valor essencialmente semelhante ao da alumina de referência. Para efeitos de comparação, para zircônia tetragonal policristalina estabilizada com ítrio, a resistência à flexão pode ser por volta de 1 GPa [42]

Resistência e tenacidade são geralmente consideradas mutuamente exclusivas. A introdução de um polímero ou uma fase metálica é usualmente utilizada para alterar as propriedades mecânicas de cerâmicas, mas é sempre feita às custas de resistência, dureza ou faixa de temperatura de utilização. O valor da tenacidade da alumina semelhante à madrepérola é maior do que a de valores reportados para alumina, alumina texturizada ou até mesmo para compósitos de alumina, incluindo formulações com reforços por nanotubos de carbono ou grafeno [38]

Quando se trata da escolha de materiais para aplicações estruturais, a densidade é uma consideração importante. Vidros metálicos são uns dos materiais de engenharia mais resistentes já produzidos, mas sua alta densidade limita sua aplicação. A combinação única de força e resistência específicas do material de cerâmica produzido, como mostrado na Figura 22, corresponde àquelas de compósitos de polímeros reforçados com fibra de carbono (CFRP).
Figura 42

Figura 41. Comparação relativa da performance de materiais Extraído de [38]



Fonte: BOUVILLE (2014)

As dimensões das amostras utilizadas pelos pesquisadores limitavam-se a alguns centímetros de diâmetro e alguns milímetros de espessura. Duas etapas do processo induzem restrições de tamanho: congelamento e sinterização.

Os pesquisadores acreditam que não há razões fundamentais para que o processo não seja escalado. Além disso, eles apontam que essa abordagem deve atender aos requisitos para a maioria das aplicações estruturais de

cerâmica, como processamento de metais fundidos e motores de moldagem ou de alto desempenho.

A longo prazo, eles acreditam ainda que as estruturas do projeto utilizados nesse trabalho aqui não se restringe somente ao *ice templating*, podendo ser adaptado a rotas de processamento coloidal padrão, ideia que já estava sendo.

3.3 Outros estudos sobre materiais cerâmicos

O caso apresentado no tópico anterior é somente um exemplo de como o biomimetismo vem sendo considerado como guia para uma nova abordagem no desenvolvimento de materiais. Esta seção apresentará outros estudos no campo das cerâmicas, como uma forma de estimular o leitor a ter uma nova visão na busca por novas soluções de engenharia

3.3.1 *Cerâmicas inspiradas geologicamente, feitas a base de água e à temperatura ambiente [43]*

Esse estudo relata um método de como produzir cerâmicas densas a temperatura ambiente para produzir cerâmicas densas e fortes dentro de escalas de tempo comparáveis àquelas dos processos de fabricação convencionais, inspirados nos processos de biomineralização e de como materiais cerâmicos densos são formados dentro da água, caso do calcário (CaCO_3) em corais.

3.3.2 *Uma folha sintética: O potencial biomimético do óxido de grafeno [44]*

Essa pesquisa parte do princípio que o óxido de grafeno (GO) possui características micro e nano que se assemelham do ponto de vista funcional àquelas estruturas localizadas nas paredes celulares das plantas, envolvidas no transporte de água. O óxido de grafeno é um derivado do grafeno que é composto de regiões hidrofóbicas primitivas e regiões oxidadas hidrofílicas que contêm grupos de oxigênio funcionalizados nos planos e bordas basais. Essas regiões oxidadas agem para espaçar os cristais GO, formando nanocapilares de grafeno. Esses poros são cerca de uma ordem de grandeza menor do que os poros das paredes celulares das folhas, mas podem funcionar de maneira similar em termos da geração de forças capilares.

Dessa forma, pode ser possível projetar e construir árvores biomiméticas, permitindo aplicações potenciais como bombeamento passivo de água, filtragem e resfriamento evaporativo. Assim, o estudo, testa a adequação do GO como uma folha de árvore sintética.

3.3.3 Nano revestimentos biomiméticos com propriedades mecânicas, de barreira e retardantes de chama [45]

Essa pesquisa mostra o desenvolvimento de revestimentos em escala nanométricas, inspiradas na madrepérola. Diferentemente de nano compósitos poliméricos convencionais, esse revestimento contém uma elevada concentração de nano folhas, que podem ser bem alinhados ao longo da superfície do substrato. Além disso, tanto as nano folhas quanto a matriz polimérica podem ser quimicamente reticuladas. Como resultado, os nano revestimentos exibem propriedades mecânicas elevadas, propriedades de barreira (para oxigênio e vapor de água) e retarda a chama, além de serem altamente transparentes. Podem ser aplicados em substratos tanto regulares quanto irregulares.

4 Conclusão

Esse trabalho mostrou que o campo do biomimetismo, ou biomimética, é um campo muito vasto e de inesgotável fonte de conhecimento, uma vez que a Natureza está por todos os lados e de todos eles se podem tirar alguma lição.

Esse novo campo de ciência que vem se encorpando apresenta um grande potencial. Muitos exemplos foram apresentados de tecnologias ou mecanismos que já existem, mas há muitos desafios pela frente e começar a olhar a Natureza e tudo que a compõe com outros olhos pode trazer mudanças significativas nas ciências e na tecnologia. Muitos mecanismos e novos materiais poderão ser desenvolvidos, aprimorados e trabalhados a ponto de se tornarem escaláveis e viáveis.

Muitos trabalhos estão sendo feitos e com abordagens diferentes. A ciência dos materiais pode se beneficiar e muito com o biomimetismo, pois pode proporcionar uma nova forma de tentar sanar e compensar as restrições que muitos materiais apresentam, possibilitando novas formas de utilização e o desenvolvimento de novos materiais, alguns até bem improváveis até então, com novas propriedades e habilidades.

5 Referências

- 1.IG São Paulo. Desperdício recorde de resíduos no País contribui para déficit ecológico mundial. IG. 2018. Disponível em: <<https://ultimosegundo.ig.com.br/ciencia/meioambiente/2018-08-02/dia-da-sobrecarga-da-terra.html>>. Acesso em: 3 set. 2018.
- 2.SANTOS, Jacques Julião do Patrocínio. Biomimetismo: Como imitar a natureza na Arquitetura. Lisboa, 2009. 186 p. Monografia (Arquitetura) - Universidade Técnica de Lisboa, 2009
- 3.BHUSHAN, Bharat. Biomimetics: lessons from nature: an overview. Philosophical Transactions of The Royal Society, v. 367, n. 6, p. 1445-1486, 6 maio 2017.
- 4.ARRUDA, Amilton J.V.. O que é biônica?. Revista Arte Comunicação. Recife, v. 1, p. 19-24, 15 junho 1994
- 5.BAR-COHEN, Yoseph . Biomimetics: mimicking and inspired-by biology. Smart Structures and Materials 2005: Electroactive Polymer Actuators and Devices. San Diego, California, v. 5759, 2005,18-25 p
- 6.VINCENT, Julian F.V. et al. Biomimetics: its practice and theory. Journal of the Royal Society: Interface. Bath, v. 3, p. 471-482, 18 abr 2006.
- 7.ANTUNES, Daige Corrêa; FILHO, José de Cerqueira. Alberto Santos do Dumont: A História da Invenção do Avião. Artigo Público do Estado de São Paulo. São Paulo, v. 1, p. 25, 05 maio 2006
- 8.BENYUS, Janine. Biomimética: Inovação Inspirada pela Natureza. 3. ed. Cultrix, 2003. 304 p
- 9.BIOMIMÉTICA. Biomimética e Sustentabilidade. 2005. Disponível em: <<http://www.biomimetica.com.br/metodologia--ferramentas.htm>>. Acesso em: 20 outubro. 2018
- 10.MUELLER, Tom. Biomimetics: Design by Nature: What has fins like a whale, skin like a lizard, and eyes like a moth? The future of engineering. National Geographic Magazine, p. 7, 15 abril 2008
- 11.CHAN, Wah-Ho; LU, Ming; ZHANG, Jian-Ping. Attaining Cost Efficiency in Constructing Sports Facilities for Beijing 2008 Olympic Games by use of Operations Simulation. ResearchGate. 2006. Disponível em:<https://www.researchgate.net/figure/Steel-structure-of-the-Birds-Nest_fig1_221527053>. Acesso em: 31 outubro. 2018

12. BONIFANT, Susan. The empty nest marriage: Deciding whether to stay or go. The Washington Post. 2017. Disponível em: <<https://www.washingtonpost.com/news/parenting/wp/2017/04/13/the-empty-nest-marriage-deciding-whether-to-stay-or-go/>>. Acesso em: 30 out. 2018

13. MANN, Stephen. Biomimetic Materials Chemistry. John Wiley, 1995. 400 p

14. CREMALDI, Joseph C.; Bharat Bhushan. Bioinspired self-healing materials: lessons from nature. Beilstein Journal of Nanotechnology, v. 9, p. 907-935, 19 março 2018

15. KITE-POWELL, Jennifer . Grass Clippings Turned Into Solar Cells by MIT Scientist. Forbes. 2012. Disponível em: <<https://www.forbes.com/sites/jenniferhicks/2012/02/21/grass-grass-clippings-turned-into-solar-cells-by-mit-scientist/#4ebc095d2629>>. Acesso em: 6 novembro. 2018

16. JOHNSON, Randolph. MIT envisions DIY solar cells made from grass clippings. New Atlas. 2012. Disponível em: <<https://newatlas.com/mit-diy-solar-cells-grass-clippings/21341/>>. Acesso em: 26 nov. 2018

17. KANOU, Yukiko. AIST Makes Tree With Solar-cell Leaves. XTECH. 2018. Disponível em: <https://tech.nikkeibp.co.jp/dm/english/NEWS_EN/20080527/152443/>. Acesso em: 5 dezembro. 2018

18. SCHULTE, Anna Julia; KOCH, Kerstin; SPAETH, Manuel . Biomimetic replicas: Transfer of complex architectures with different optical properties from plant surfaces onto technical materials. Acta Biomaterialia, v. 5, p. 1848-1854, 5 julho 2009

19. KOCH, Kerstin; BHUSHAN, Bharat; BARTHLOTT, Wilhelm. Diversity of structure, morphology, and wetting of plant surfaces. Soft Matter, p. 1943-1963, 18 setembro 2008

20. SLIPS (Slippery Liquid-Infused Porous Surfaces). WYSS INSTITUTE. 2018. Disponível em: <<https://wyss.harvard.edu/technology/slips-slippery-liquid-infused-porous-surfaces/>>. Acesso em: 6 novembro. 2018

21. SOBRE A MARCA VELCRO®. Velcro. 2018. Disponível em: <<https://www.velcro.com.br/quem-somos/nossa-marca/>>. Acesso em: 6 novembro. 2018.

22. GUNTHER, Susan. 8 Amazing examples of biomimicry. MNN. 2016. Disponível em: <<https://www.mnn.com/earth-matters/wilderness->

resources/photos/7-amazing-examples-of-biomimicry/burr-velcro>. Acesso em: 31 outubro. 2018

23.KRINK, Thiemo; VOLLRATH, Fritz. Analysing Spider Web-building Behaviour with Rule-based Simulations and Genetic Algorithms. *Journal of Theoretical Biology*, v. 185, p. 321-331, 7 abril 1997

24.MACKENZIE, Craig. Spider webs found to attract insects by pulling them in using electric charge created by their own flapping wings. *Mail Online*. 2013. Disponível em: <<https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2357851/Spider-webs-attract-insects-pulling-using-electric-charge-created-flapping-wings.html>>. Acesso em: 6 novembro. 2018

25.WEGST, Ulrike et al. Bioinspired structural materials. *Nature Materials*, 26 outubro 2014

26.MATTHECK, Claus. Wood - The Internal Optimization of Trees. *Arboricultural Journal*. Berlin, p. 14-21, maio 1995

27.KONG, Xiangdong et al. Silk fibroin regulated mineralization of hydroxyapatite nanocrystals. *Journal of Crystal Growth*. Pequim, v. 270, p. 197-202, 15 setembro 2004

28.LIU, Gao; ZHAO, Dacheng ; TOMSIA, Antoni P.. Three-Dimensional Biomimetic Mineralization of Dense Hydrogel Templates. *Journal of the Chemical Society*, v. 131, p. 9937-9939, 18 maio 2009

29.WALTHER, Andreas; MÜLLER, Axel H.E.. *Janus Particles: synthesis, self-assembly, physical properties and applications* . ACS Publications

30.ERB, Randall M.; LIBANORI, Rafael; ROTHFUCHS, Nuria. Composites Reinforced in Three Dimensions by Using Low Magnetic Fields. *Science*, v. 335, p. 199-204, 13 janeiro 2012

31.ASHBY, Michael F.. *Materials Selection in Mechanical Design*. 4. ed. Elsevier, 2010. 712 p

32.RICHIE, Robert O. The Conflicts Between Strength and Toughness. *Nature Materials*. Berkeley, p. 817-22, novembro 2011.

33.AUERKARI, Pertti. Mechanical and physical properties of engineering alumina ceramics. *Technical Research Centre of Finland*. Espoo, p. 56-78, 25 junho 1996

34.CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G.. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 9. ed. John Wiley & Sons, 2013. 960 p

35. COCKEY, Christine . Mother of Pearl - Nacre. Science Fun. Nova Zelândia, 2014. Disponível em: <<https://mistralmtn.blogspot.com/2014/09/mother-of-pearl-nacre.html>>. Acesso em: 25 nov. 2018
36. BARTHELAT, François ; LI, Chun-Ming; COMI, Claudia. Mechanical properties of nacre constituents and their impact on mechanical performance. Journal of Materials Research, v. 21, p. 1977-1986, 8 agosto 2006.
37. SUN, Jiyu ; BHUSAN, Bharat . Hierarchical structure and mechanical properties of nacre: a review. Royal Society of Chemistry, v. 2, p. 7617-7632, 3 maio 2012
38. BOUVILLE, Florian; MAIRE, Eric; MEILLE, Sylvain. Strong, tough and stiff bioinspired ceramics from brittle constituents. Nature Materials, p. 508-514, 23 03 2014
39. DEVILLE, Sylvain. Ice-templating, freeze casting: Beyond materials processing. Journal of Materials Research, p. 2202-2219, 21 maio 2013
40. CETESB. Ficha de Informação de Produto Químico. Sistemas Inter. Disponível em: <http://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=%D3XIDO%20DE%20C%1LCIO>. Acesso em: 19 nov. 2018
41. PELISSARI, Pedro I.B.G.B. et al. Nacre-like ceramic refractories for high temperature applications. Journal of the European Ceramic Society, v. 38, p. 2186-2193, 4 abril 2018
42. YOSHIMURA, H.N. et al. Zircônia parcialmente estabilizada de baixo custo produzida por meio de mistura de pós com aditivos do sistema MgO-Y₂O₃-CaO. Cerâmica, v. 53, p. 16-132, 2007
43. BOUVILLE, Florian; STUART, André R.. Geologically-inspired strong bulk ceramics made with water at room temperature. Nature Communication, 6 março 2017
44. LAMB, Marilia; KOCH, George W.; MORGAN, Eric R.. A synthetic leaf: The biomimetic potential of graphene oxide. In: PROCEEDINGS OF SPIE - THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING, San Diego, 2015
45. DING, Fuchuan; LIU, Jingjing; ZENG, Songshan. Biomimetic nanocoatings with exceptional mechanical, barrier, and flame-retardant properties from large-scale one-step coassembly. Science Advances, v. 3, 19 julho 2017