

TEORIAS DA TECTÔNICA DIGITAL: DISCUSSÕES E SÍNTESES

Ana Carolina Santos Vicente ¹
Denise Mônaco dos Santos ²

Universidade Federal de Viçosa
Universidade Estadual Paulista

RESUMO: A noção da tectônica, explorada desde o século XIX por Bötticher e Semper, destaca a relação entre as dimensões ontológicas e simbólicas da arquitetura. Kenneth Frampton, no final do século XX, redefiniu-a como a "poética da construção". As primeiras teorizações associadas ao digital surgiram a partir das reflexões sobre as novas lógicas de processos computacionais de projeto, frente às ideias de Frampton. Este estudo, baseado em revisão de literatura, busca identificar a viabilidade de discutir os novos paradigmas da "tectônica digital" com base nas teorias da tectônica. Os resultados mostram que, apesar da aparente contradição entre materialidade e digitalidade, os processos computacionais permitem que o arquiteto controle os elementos tectônicos através de explorações artísticas, materiais e construtivas. Propõe-se, assim, que a tectônica pode ser considerada a partir de três grandes áreas inerentes à arquitetura: a qualidade, a fisicalidade e os processos do fazer.

PALAVRAS-CHAVE: Teoria da arquitetura; Tectônica digital; Processos computacionais de projeto; Fabricação digital.

ABSTRACT: The notion of tectonics, explored since the 19th century by Bötticher and Semper, highlights the relationship between the ontological and symbolic dimensions of architecture. Kenneth Frampton, in the late 20th century, redefined it as the "poetics of construction." The initial theorizing associated with the digital emerged from reflections on the new logics of computational design processes in light of Frampton's ideas. This study, based on a literature review, seeks to identify the feasibility of discussing the new paradigms of "digital tectonics" based on the theories of tectonics. The results show that, despite the apparent contradiction between materiality and digitality, computational processes allow architects to control tectonic elements through artistic, material, and constructive explorations. Thus, it is proposed that tectonics can be considered in three major areas inherent to architecture: quality, physicality, and processes of making.

KEYWORDS: Architectural theory; Digital tectonics; Computational design processes; Digital fabrication.

¹ Mestre em Arquitetura e Urbanismo, acarolinasvicente@gmail.com

² Doutora em Arquitetura e Urbanismo, denise.monaco@unesp.br

Introdução

A noção da tectônica atravessou a teoria da arquitetura em diversos momentos. Durante o século XIX, a partir das contribuições de Schinkel, Bötticher e Semper, a discussão ganhou caráter teórico ao integrar à tradição clássica as tecnologias da época e debates artístico-filosóficos acerca da expressividade simbólica arquitetônica (ANDRADE, 2016; SCHWARZER, 2017). Entretanto, a interpretação proposta por Kenneth Frampton, no final do século XX, é a mais consolidada na teoria da arquitetura contemporânea. Esta, foi uma tentativa de contraposição a correntes da arquitetura dita pós-moderna que privilegiavam o caráter semiológico em detrimento da ontologia arquitetônica (ANDRADE, 2016; FRAMPTON, 2006). Para Frampton, a tectônica, dotada de expressividade, uma dimensão poética a partir da relação simbólica entre o objeto e o observador, intensificando a expressividade das dinâmicas estrutural e construtiva (YAN; YUAN, 2021).

A tectônica auxilia na compreensão de relações intrínsecas à arquitetura, como espaço e construção, ornamento e estrutura, poética e função, criando conexões entre esses aspectos na arquitetura (SCHMIDT; KIRKEGAARD, 2005; SCHWARTZ, 2017). Com a introdução de tecnologias computacionais nos processos de projeto, desde as etapas iniciais até a fabricação, tais relações começaram a ser repensadas, especialmente no que tange à materialidade (SÁNCHEZ VELASCO; CASTRO SALGADO, 2020). Os processos computacionais de projeto e a fabricação digital possibilitam que as propriedades dos materiais, tanto estéticas quanto de desempenho mecânico e físico-químico, possam ser incorporadas já na concepção do projeto, permitindo que a materialidade, assim como os sistemas estrutural e construtivo, sejam declaradamente informados nos estágios iniciais de projeto (ANDERSSON; KIRKEGAARD, 2006; OXMAN, 2017; PICON, 2013; SANTOS; PAOLETTI, 2020).

Tais processos instauram um novo paradigma em projeto, nos quais as ferramentas computacionais mas situam-se para além da simples edição de geometrias. Essas ferramentas auxiliam na busca por soluções através de processos algorítmicos e paramétricos, baseados na introdução de dados variáveis e na manipulação de atributos mensuráveis de diferentes naturezas (LEACH, 2014). Esses processos parecem determinar horizontes profícuos de exame e exploração não mais estabelecidos sob a perspectiva da automatização da representação gráfica, mas ante a computação voltada para análises, simulações, otimizações e novos métodos de fabricação (CAETANO; SANTOS; LEITÃO, 2020).

Tudo isso resulta na determinação da chamada tectônica digital, que descreve a possibilidade de incorporação de dados sobre a materialidade aos processos computacionais, desde a geração até a fabricação (BALÍŃSKI; JANUSZKIEWICZ, 2016; SANTOS; PAOLETTI, 2020). Embora existam similaridades conceituais entre as perspectivas acerca da tectônica digital, parece não haver consenso sobre sua definição (OXMAN, 2012). Diante disso, esta pesquisa visa discutir a pertinência de se considerar a tectônica, suas bases teóricas e seus elementos no contexto dos processos computacionais de projeto, a partir de equivalências conceituais. Este estudo, previamente apresentado e publicado em congresso, desenvolve reflexões e sínteses iniciais, e pretende contribuir com a discussão acerca da tectônica nos processos computacionais de projeto, mais do que estabelecer conclusões e definições acabadas.

A metodologia baseou-se na revisão de literatura narrativa sobre a teoria da tectônica na arquitetura. Foram consultados livros, capítulos de livros e artigos científicos para construir um panorama do desenvolvimento teórico. Para a tectônica, a obra de Kenneth Frampton foi a referência central para a seleção de outros autores relevantes. No contexto da tectônica digital, foram considerados trabalhos publicados em repositórios acadêmicos e em revistas de impacto internacional. Os termos de busca utilizados foram “tectônica digital” e “tectônica + digital” em português e inglês, com preferência por artigos publicados a partir de 2016, embora estudos mais antigos tenham sido incluídos devido à sua relevância.

A tectônica na historiografia da arquitetura

A tectônica, termo utilizado na arquitetura desde a Grécia Antiga, deriva da palavra grega *tékton*, que significa carpinteiro ou construtor. Seu significado transformou-se ao longo da história, aludindo inicialmente à arte da construção (Homero, 900 a.C.), assumindo conotação poética (Safo, 600 a.C.) e abrangendo tudo relativo à construção (escritos franceses dos séculos XVII e XVIII). No entanto, foi no século XIX, na Alemanha, que o estudo da acerca da noção da tectônica ganhou profundidade a partir das teorias de Friedrich Schinkel, Karl Bötticher e Gottfried Semper (FRAMPTON, 1990; 1996;).

Na década de 1820, Karl Friedrich Schinkel desenvolveu ideias sobre a atribuição de significados a técnicas construtivas através de articulações materiais, estruturais e artísticas (FRAMPTON, 1996). Schinkel acreditava que o ornamento permitia à arquitetura incorporar um viés simbólico, transmitindo os significados das escolhas formais, materiais e técnicas ao

observador. O autor propôs a divisão entre as dimensões artísticas (comunicação de significado) e construtivas (funcionalidade) e introduziu a noção de *Grundformen* (formas básicas) como sistema unificador. Nesse contexto, a intencionalidade do arquiteto era fundamental para integrar aspectos simbólicos e operacionais (SCHWARZER, 2017).

A noção de *Grundformen* foi desenvolvida na teoria tectônica de Karl Bötticher, que integrou as ideias de Schinkel, os princípios classicistas de Aloys Hirt (1759-1837) e a racionalidade construtiva gótica de Heinrich Hübsch (1795-1863). Bötticher sistematizou essas influências através da dicotomia entre ontologia e semiologia, estrutura e ornamento. Ele argumentava que a arquitetura, através de uma linguagem artística e simbólica, transcendia o pragmatismo da construção (FRAMPTON, 1996; SCHWARZER, 1993, 2017).

Bötticher buscou dar significado à construção por meio de símbolos artísticos, notadamente o ornamento. Sua teoria da tectônica incorporava aos aspectos construtivos uma linguagem simbólica que comunicava tensão, harmonia, movimento e proporção. Para ele, o simbolismo artístico dependia de variáveis como necessidade, disponibilidade material e inovação tecnológica, permanecendo vinculado à natureza utilitária da arquitetura. Bötticher reinterpretou a estética filosófica para a arquitetura, propondo que a beleza estava intrínseca à explicitação semiológica dos aspectos ontológicos, sendo essencial que o ornamento não ocultasse a essência construtiva da edificação (FRAMPTON, 1996; SCHWARZER, 1993).

A delimitação espacial era central na teoria de Bötticher, conectando função, estrutura e arte, e integrando as ordens mecânica e artística na arquitetura. O espaço constituía a essência da construção enquanto arte, seguido pelas fases projetuais de função e expressão. O autor definiu as dimensões operacionais como *Werkformen* (ontológicas e estruturais) e as artísticas como *Kunstformen* (simbólicas). As operacionais incorporavam a materialidade funcional, enquanto as artísticas constituíam a camada expressiva (SCHWARTZ, 2017; SCHWARZER, 1993). Entender a tectônica, segundo Bötticher, era compreender a harmoniosa de função, estrutura, espaço e arte nos edifícios arquitetônicos (SCHWARZER, 1993).

Gottfried Semper discordava de Karl Bötticher sobre o papel do ornamento, enfatizando a relação entre arte e tecnologia na arquitetura. Para ele, o ornamento simbolizava um retorno às práticas artísticas primitivas, enquanto a construção atendia às demandas de seu tempo (AMARAL, 2009; SCHWARZER, 2017). Influenciado pela teoria etnográfica de Gustav Klemm, Semper associou o surgimento das expressões artísticas à noção de *Kunsttrieb*, ou "impulso artístico", comparável aos instintos humanos na busca por descanso e proteção. Estes,

que fizeram o homem primitivo fabricar instrumentos como o abrigo (VIANA, 2017). Rejeitando o modelo de cabana primitiva de Marc-Antoine Laugier, Semper propôs um modelo baseado na teoria dos quatro elementos originais da arquitetura: lareira, aterro, telhado e envoltória (AMARAL, 2009; FRAMPTON, 1990, 1996; SCHWARZER, 2017).

Em "*Die vier Elemente der Baukunst*" (1851), Semper adicionou uma camada antropológica à tectônica ao considerar a lareira como o elemento com maior valor espacial, por representar o símbolo sagrado de socialização humana. Os outros elementos tinham como finalidade proteger a lareira da umidade do solo, das intempéries e dos ventos. O desenvolvimento da noção da tectônica, para Semper, estava relacionado à como as primeiras artes técnicas se conectavam à cada elemento arquitetônico: cerâmica (lareira), alvenaria (aterro), carpintaria (telhado) e técnica têxtil (envoltória) (AMARAL, 2009; FRAMPTON, 1990, 1996; MALLGRAVE, 2017). Semper também propôs quatro categorias de materiais: argila, pedra, madeira e tecido, defendendo que a articulação entre elementos, técnicas e materiais deveria elevar o material à sua expressividade máxima (AMARAL, 2009; DEAMER, 2000; FRAMPTON, 1996). Tais associações não eram deterministas, podendo ser alteradas de acordo com o contexto, as necessidades funcionais, os avanços tecnológicos e as intenções do arquiteto (AL-ALWAN; MAHMOOD, 2020; AMARAL, 2009).

Além disso, Semper classificou as técnicas construtivas em dois sistemas: a tectônica da estrutura, baseada em matrizes espaciais a partir de materiais leves como madeira e tecido; e a estereotômica da massa comprimida, formação de volumes densos através do empilhamento de materiais pesados, como argila e pedra. Esses sistemas poderiam variar conforme o clima, a cultura e a disponibilidade material local (FRAMPTON, 1996; NESBITT, 2006). O autor buscou integrar as dimensões construtiva e simbólica em uma teoria da tectônica que combinasse as artes mecânicas e plásticas (SCHWARZER, 2017), tentando garantir que a produção espacial não fosse reduzida à utilidade, mas que estivesse relacionada aos fatores expressivos, simbólicos, artísticos e estéticos da arquitetura (FRAMPTON, 1990, 1996).

As discussões de Bötticher e Semper foram cruciais para a teoria da tectônica na arquitetura, como reconheceu Eduard Sekler em seu ensaio "*Structure, Construction, Tectonics*" (1965). Entretanto, ao invés de abordar a dicotomia entre ontológico e simbólico, Sekler diferenciou os três conceitos inter-relacionados na arquitetura: estrutura, construção e tectônica (SEKLER, 1965). O autor definiu a estrutura como uma noção abstrata relacionada à concepção, ordenação e eficiência dos sistemas estruturais e de transmissão de forças em um

edifício. A construção seria a concretização desses sistemas por meio da escolha e manuseio de materiais, processos e técnicas. Já a tectônica seria o resultado da integração expressiva entre as lógicas estrutural e construtiva nos processos arquitetônicos. Assim, a estrutura, enquanto conceito intangível, se materializaria na construção e ganharia expressividade por meio da tectônica (SEKLER, 1965). Para Sekler, essa expressividade dependia da articulação equilibrada entre os aspectos estruturais e construtivos, conforme a intencionalidade do arquiteto, considerado por Sekler como o "mestre da expressão tectônica" (AMARAL, 2009).

No final do século XX, Kenneth Frampton retomou o debate sobre a tectônica na teoria da arquitetura, como resposta à tendência cenográfica da abordagem pós-moderna do galpão decorado (ANDRADE, 2016; NESBITT, 2006). Em "*Studies in Tectonic Culture*" (1995), Frampton argumentou que a tectônica envolve não apenas os aspectos materiais e estruturais, mas também uma poética do construir inerente à prática arquitetônica (FRAMPTON, 1990, 1996). Após estudar teorias, desde Schinkel até Sekler, ele defendeu que a noção da tectônica abrange contrastes como operacional versus artístico, e técnico versus poético, destacando que o objeto tectônico pode ser entendido como ontológico ou simbólico. Entretanto, tais contrastes devem ser articulados através da tectônica, pois, apesar de seu caráter poético a arquitetura não pode ser desvinculada dos aspectos técnicos (FRAMPTON, 1990, 1996).

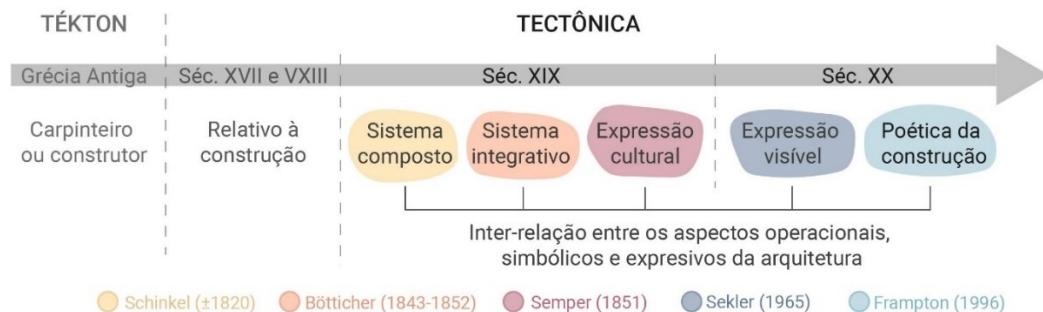
Frampton argumentou que as técnicas, materiais e contextos culturais podem variar ao longo do tempo, conferindo um caráter "aestilístico" à tectônica, cujos componentes podem ser encontrados em obras de diversas origens, formas e funções. Para ele, a junção (conexão entre diferentes componentes construtivos) garantia que a arquitetura não fosse reduzida a estilos, por evidenciar particularidades culturais e simbólicas. Nesse sentido, tanto a conexão como a ruptura entre componentes construtivos poderiam conferir significado à arquitetura, de acordo com a intencionalidade do arquiteto (FRAMPTON, 1990, 1996).

Influenciado pela fenomenologia de Martin Heidegger, Frampton argumentou que a tectônica adquire caráter fenomenológico ao retornar à essência da forma arquitetônica, por meio da manipulação de componentes simbólicos e da percepção espacial (FRAMPTON, 1990, 1996; NESBITT, 2006). Ele via o potencial tectônico de um edifício na capacidade de articular e expressar os diferentes aspectos da arquitetura através de materiais, técnicas e sua relação com a cultura e o lugar (FRAMPTON, 1996). Foi a partir dessas reflexões que a interação entre o Ser e o espaço construído foi considerada fundamental para a tectônica, que adquiriu um

caráter crítico e artístico, sendo definida como a “poética da construção” capaz de integrar as diferentes dimensões da arquitetura (AL-ALWAN; MAHMOOD, 2020).

Ao longo do tempo a noção de tectônica na teoria da arquitetura incorporou novos componentes e elaborações entre a arte e a técnica, mantendo o caráter simbólico como fundamental (Figura 1). A elaboração de Frampton retomou o debate e fundamentou diversos estudos subsequentes. Por isso, entende-se que a sua definição da tectônica como a "poética da construção" que integra aspectos técnicos, materiais, culturais e expressivos da arquitetura é considerada a mais adequada para basear as discussões deste artigo.

Figura 1. Evolução da noção de tectônica.



Fonte: Autoras.

Elementos da tectônica

A partir das discussões teóricas mais relevantes acerca da tectônica, algumas pesquisas exploraram seus elementos fundamentais e propuseram elaborações para compreender melhor o que a constitui (AL-ALWAN; MAHMOOD, 2020; SCHWARTZ, 2017).

O estudo de Liu e Lim (2006) foi pioneiro ao sistematizar e decompor a teoria da tectônica em elementos essenciais de análise: **1) Junção:** articula diversos componentes construtivos da arquitetura, independentemente da escala; **2) Detalhe:** sugere as relações entre partes e todo por meio da materialidade, podendo estar associado à junção; **3) Material:** estabelece a composição física arquitetônica; **4) Objeto:** surge da conformação material e é composto pelas partes que formam o todo, como janelas e portas; **5) Estrutura:** trata da transição mecânica de forças; **6) Construção:** realização física da estrutura que organiza as relações entre os objetos; **7) Interação:** aborda as relações entre arquitetura e lugar, através das condicionantes ambientais, da conexão com o entorno e da percepção dos indivíduos.

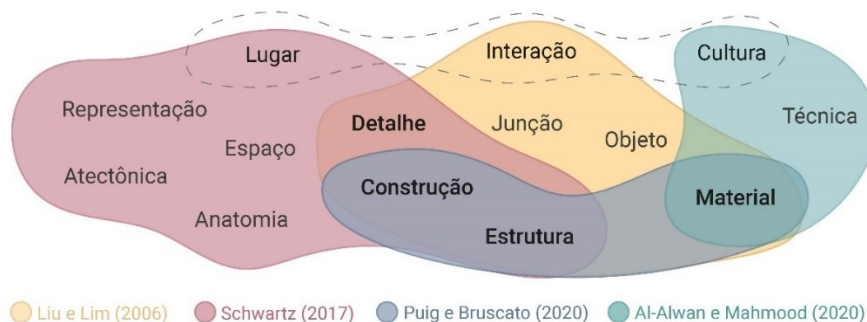
Schwartz (2017) analisou o conceito da tectônica como um aspecto que mantém seus elementos constituintes independentemente dos processos de projeto ou construção: **1)**

Anatomia: baseada na teoria de Semper, inclui componentes e sistemas primários como lareira, aterro, telhado e envoltória; **2) Construção:** considera como esses sistemas são construídos através dos métodos que conformam a materialidade do espaço; **3) Espaço:** relaciona a criação da espacialidade com o caráter expressivo da arquitetura; **4) Expressão:** junto do ornamento, integra aspectos técnicos e artísticos; **5) Lugar:** considera o impacto dos contextos local, ambiental e cultural; **6) Detalhe:** analisa a junção dos componentes que formam o detalhe e a interseção dos sistemas arquitetônicos que formam o todo; **7) Tectônica:** aborda condições que distorcem a expressão tectônica.

Em 2020, foram publicados dois estudos com propostas de sistematizações acerca dos elementos da tectônica. Al-Alwan e Mahmood (2020) definiram a tectônica como a articulação dos aspectos estéticos, estruturais, construtivos e materiais da arquitetura, destacando os elementos: **1) Material:** abrange ontologia e estrutura; **2) Técnica:** inclui tecnologia e construção; **3) Cultura:** relaciona arte e percepção nos processos construtivos tradicionais. Já Puig e Bruscato (2020) destacaram ornamento, estrutura, material, construção e expressão como palavras chave ligadas à tectônica e sintetizaram a teoria de Sekler, propondo os seguintes elementos: **1) Estrutura:** sistema conceitual que lida com as forças atuantes no edifício; **2) Construção:** operacionalização do sistema estrutural através da materialidade; **3) Material:** abrange todos os componentes construtivos.

Após a análise dos estudos apresentados, acredita-se que há uma relação entre suas sistematizações, sendo possível propor uma síntese dos elementos constituintes da tectônica. Elementos comuns a mais de uma sistematização incluem: **Detalhe, Material, Estrutura e Construção.** Além disso, **Cultura, Interação e Lugar,** que sugerem o relacionamento entre os contextos local e cultural e a percepção dos usuários, poderiam constituir um único elemento (Figura 2). Considera-se, portanto, que esses elementos podem ser o ponto de partida para uma síntese da tectônica em seus elementos constituintes.

Figura 2. Elementos da tectônica.



Fonte: Autoras.

A tectônica digital

A "primeira virada digital", termo proposto por Carpo (2013), marca o período em que as tecnologias digitais começaram a influenciar a sociedade e a produção arquitetônica. Ferramentas computacionais do tipo *Computer-Aided Design* (CAD) e *Computer-Aided Manufacturing* (CAM) passaram a ser usadas para além de instrumentos de representação, constituindo uma nova lógica projetual (GAO, 2004), a partir de seu potencial de formação generativa, simulação e otimização (LEACH, 2009). O que configurou novos processos de projeto, com características de diferentes naturezas, através da integração de componentes construtivos e materiais (OXMAN, 2017; CAETANO, SANTOS e LEITÃO, 2020). Isso levou a noção da tectônica para o centro das discussões teóricas da arquitetura (HVEJSEL; BEIM; BUNDGAARD, 2014; OXMAN, 2012).

O uso de tecnologias computacionais e de fabricação digital possibilitou novas lógicas de projeto, possibilidades formais e abordagens acerca da materialidade (AL-ALWAN; MAHMOOD, 2020; YAN; YUAN, 2021). A noção de tectônica, como interpretada por Frampton, parece insuficiente para abarcar as particularidades do paradigma computacional (OXMAN, 2012). Frente à tentativa de relacionar esses contextos em uma perspectiva teórica, foram propostas definições para o que se chamou tectônica digital como estratégia para explorar a manipulação da forma e das propriedades construtivas e materiais, através de processos como *form-finding*, métodos generativos, análise e simulação, e fabricação digital, que podem ser distintos entre si (AL-ALWAN; MAHMOOD, 2020; YAN; YUAN, 2021).

Pouco após a publicação de "*Studies in Tectonic Culture*" de Frampton, William J. Mitchell abordou a dicotomia entre materialidade e digitalidade, afirmando que a materialidade se beneficiou do mundo computacional, permitindo que a exploração de espaços arquitetônicos digitais auxiliasse a construção de espaços físicos, e vice-versa. A introdução da fabricação

digital nas práticas arquitetônicas reduziu essa oposição, oferecendo novas possibilidades construtivas e transformando a lógica de projeto de linear para procedural. Mitchell reconheceu que a arquitetura concebida digitalmente também pode ter um caráter simbólico, mostrando que mesmo a arquitetura gerada digitalmente é dotada de componentes tectônicos trabalhados de diversas maneiras (MITCHELL, 1998).

Beesley e Seebohm (2000) definiram a tectônica digital como uma metodologia de projeto que combina design digital e métodos construtivos tradicionais. Apesar da tendência do ambiente computacional à abstração espacial, em detrimento da materialidade física, essa metodologia combina algoritmos digitais e ordenações geométricas com componentes físicos construtivos. Para os autores, a utilização de ferramentas digitais para experimentação projetual, associada à intencionalidade material, pode produzir uma arquitetura com forte expressividade tectônica (BEESLEY; SEEBOHM, 2000).

Gao (2004) destacou que tecnologias digitais, como CAD/CAM, exigem considerações sobre novos materiais, métodos e técnicas na produção formal e espacial. Também é importante relacionar a arquitetura ao seu contexto físico e social, por meio da manipulação direta dos componentes arquitetônicos desde a concepção até a fabricação, para transmitir a expressividade tectônica. A tectônica digital, enquanto nova metodologia, permitiria a interação entre formas, parâmetros e expressividade dos materiais e componentes construtivos em uma estrutura lógica, explícita e declarada, intencionalmente projetada e desenvolvida em um processo não necessariamente linear (GAO, 2004).

Na antologia *Digital Tectonics* (2004), Leach, Turnbull e Williams propuseram a tectônica digital como uma reinterpretação da tectônica de Frampton (SCHUMACHER, 2017), como um novo paradigma em processos de projeto viabilizado pelas tecnologias digitais (JABI, 2004; OXMAN, 2012). Tal paradigma permitiu a manipulação algorítmica e paramétrica dos elementos da tectônica, gerando soluções otimizadas em termos de eficiência estrutural, ambiental, acústica e funcional (AL-ALWAN; MAHMOOD, 2020; PUIG; BRUSCATO, 2020). Esse paradigma, impulsionado pelas possibilidades digitais e não limitado à representação, diferencia-se ao adotar o potencial computacional como recurso indispensável ao controle, pelo arquiteto, dos processos generativos (LEACH, 2009). Leach destacou a habilidade computacional em testar soluções projetuais variadas, considerando necessidades técnicas e demandas culturais, como a capacidade tectônica dos processos de projeto computacionais (AL-ALWAN; MAHMOOD, 2020; SCHMIDT; KIRKEGAARD, 2005). O

objetivo não seria apenas “encontrar a forma”, mas buscar uma expressividade tectônica na qual a intencionalidade do arquiteto pudesse gerar um objeto arquitetônico esteticamente interessante e funcional (LEACH, 2009; SCHMIDT; KIRKEGAARD, 2005).

Jabi (2004) atualizou a noção de tectônica de Frampton para a tectônica digital, como uma poética da arquitetura concebida, declarada e fabricada digitalmente. Ele destacou que as tecnologias digitais permitiram a transformação de ideias virtuais em objetos físicos, de maneira explícita, através da fabricação digital. Os projetos computacionais seriam dotados de expressividade se mantivessem a fundamentação teórica da tradição tectônica, incorporando os novos significados e mudanças técnico-culturais trazidas pela prática digital na arquitetura.

Oxman (2012) destacou que as tecnologias de fabricação digital ampliaram a importância da materialidade na tectônica, integrando o material como parte essencial do processo. Ela explorou como a estruturação, codificação e fabricação dos componentes materiais contribuem para a consolidação da tectônica no *material-based design*, que através do uso declarado da informação, permite uma melhor associação entre material, estrutura e forma nas lógicas de fabricação digital. Oxman (2012) propôs a "tectônica informada" como uma competência que une as premissas da tectônica e do *material-based design* por meio das tecnologias de fabricação digital. Ela enfatizou que a fabricação digital não deve ser vista apenas como uma técnica de prototipagem, mas como parte essencial do processo de projeto computacional e das complexas relações tectônicas contemporâneas (OXMAN, 2012).

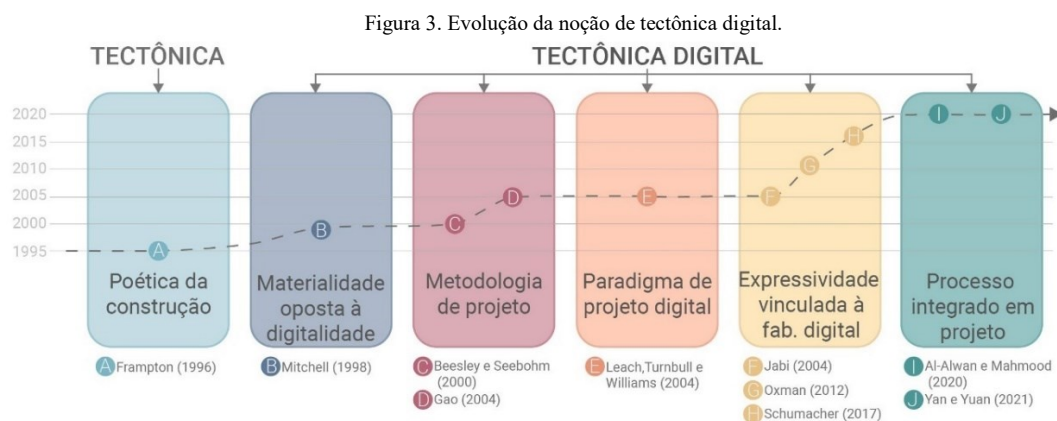
Schumacher (2017) caracterizou a tectônica digital como uma ramificação do “parametricismo”, chamada de "tectonismo", que utiliza processos declarados para unir parâmetros focados na eficiência e otimização estrutural, ambiental e funcional. Essa abordagem é marcada pela variedade formal e expressividade arquitetônica, viabilizadas pelas ferramentas computacionais generativas ligadas à fabricação digital. Ele argumentou que a competência essencial da arquitetura é a articular as dimensões técnica, social e comunicativa, chamada de "articulação tectônica", que permite a compreensão do espaço criado. Portanto, a tectônica digital articula função social, lógica estrutural e performance ambiental por meio das tecnologias computacionais e de fabricação digital (SCHUMACHER, 2017).

Al-Alwan e Mahmood (2020) afirmaram que, apesar das particularidades da tectônica digital, vinculadas a uma nova lógica projetual, os fundamentos teóricos da tectônica ainda são válidos. A tectônica digital representa uma nova abordagem arquitetônica que vai além da simples inclusão de ferramentas digitais e da atualização conceitual da tectônica, mas é um

processo metodológico integrado que considera os aspectos estéticos e técnicos, abstratos e concretos, simbólicos e funcionais da arquitetura (AL-ALWAN; MAHMOOD, 2020).

Yan e Yuan (2021) argumentaram que a tectônica digital redefine a importância das propriedades materiais e da lógica construtiva no projeto, deslocando o foco do paradigma industrial para um modelo que usa tecnologias computacionais como base para a geração formal. Nesse sentido, a tectônica digital, enquanto processo integrado, deve comunicar a lógica computacional subjacente à sua produção na era digital, considerando as propriedades materiais e estruturais, e as características morfológicas das tecnologias CAD/CAM.

Percebe-se que a noção da tectônica tem sido reconsiderada, refletindo as novas possibilidades tecnológicas, as demandas contemporâneas e das elaborações entre saber e fazer no ambiente digital, mas mantendo o caráter expressivo dos componentes construtivos e materiais (Figura 3). Portanto, a constante reavaliação da teoria da tectônica é essencial para garantir que as necessidades de cada época serão incorporadas.



Fonte: Autoras.

Elementos da tectônica digital

Ao longo do desenvolvimento da teoria da tectônica observa-se que a ideia abstrata se materializa através da construção e dos componentes materiais, resultando na forma espacial (GAO, 2004). Com a introdução das tecnologias computacionais, além da teoria arquitetônica, os processos de projeto e fabricação foram modificados, acompanhando o desenvolvimento de novos materiais, métodos construtivos e contextos socioculturais (LIU; LIM, 2006). Embora a tectônica digital mantenha bases teóricas semelhantes à tradicional, como o foco na expressividade arquitetônica, a nova lógica projetual advinda das tecnologias computacionais transformou os processos de projeto e seus aspectos técnicos (AL-ALWAN; MAHMOOD,

2020). Consequentemente, alguns estudos buscaram sistematizar os elementos e estratégias que constituem a tectônica digital.

Argumentando que a produção de projeto computacional é centrada em dados declarados, Gao (2004) resumizou os elementos da chamada tectônica digital: **1) Conceito:** envolve processos dinâmicos de desenvolvimento, como simulação e otimização; **2) Manipulação:** permite a experimentação formal e manipulação de aspectos materiais, estruturais e construtivos por meio de parâmetros; **3) Construção:** refere-se à materialidade no ambiente digital, onde componentes construtivos e materiais são informados para manipulação paramétrica; **4) Forma:** possibilita modificar diretamente as intenções de projeto no modelo, demonstrando-as de forma dinâmica; **5) Espaço:** enfatiza a interação entre a arquitetura, o contexto e as pessoas, dotando o edifício de expressividade.

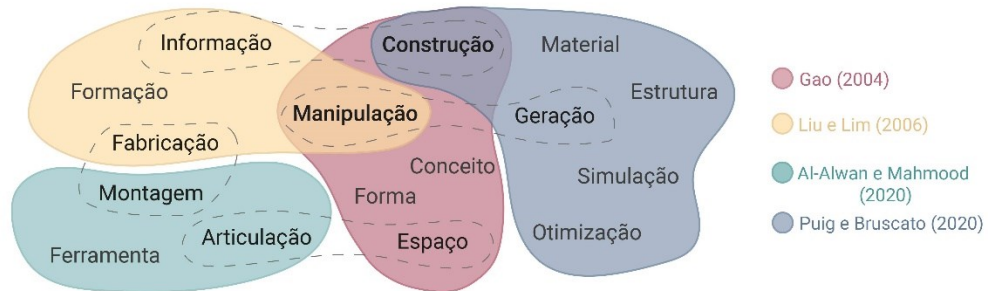
Liu e Lim (2006) também sistematizaram elementos da tectônica digital ao observar alguns fenômenos envolvidos nos processos de projeto computacionais, como a exploração formal e a prototipagem via fabricação digital. Foram propostos quatro elementos: **1) Manipulação:** operações dinâmicas na concepção e evolução formal, especialmente em processos *form-finding*; **2) Formação:** elaboração conceitual/formal através de processos algoritmo-paramétricos; **3) Informação:** configura nova materialidade digital onde dados construtivos e materiais são declarados; **4) Fabricação:** prototipagem possibilitada por tecnologias CAD/CAM, permitindo manufatura digital e novos métodos construtivos.

Com o desenvolvimento de programas de programação visual para arquitetos, como o Grasshopper®, e o estabelecimento de tecnologias de fabricação digital, novos estudos sintetizaram a tectônica digital em seus elementos constituintes. Al-Alwan e Mahmood (2020) propuseram a “tríade da tectônica digital”: **1) Ferramenta:** aspectos técnicos da produção arquitetônica, como programas computacionais; **2) Montagem:** novos métodos construtivos via fabricação digital; **3) Articulação:** dimensões poéticas, simbólicas e culturais da arquitetura. Já Puig e Bruscatto (2020) sugeriram que a tectônica digital combina **1) Material;** **2) Estrutura;** **3) Construção** (previamente apresentados) com competências da morfogênese digital: **4) Geração** da forma; **5) Simulação** ambiental e estrutural; **6) Otimização**.

A partir dessa análise, observa-se uma convergência terminológica menor entre os autores, em que termos iguais são interpretados de maneira diferente e termos distintos são conceitualmente similares, como *fabricação* e *montagem*. Elementos comuns às sistematizações incluem *geração* e *manipulação*, *construção* e *informação* (materialidade

digital), *fabricação e montagem*, e *articulação e espaço* (interação e expressividade). Acredita-se que a essência das categorizações é similar por tratar das novas lógicas inerentes aos processos computacionais de projeto, mas mantendo os fundamentos da tectônica sedimentados pela teoria contemporânea de Kenneth Frampton (1996).

Figura 4. Elementos da tectônica digital.



Fonte: Autoras.

Possíveis paralelos

Ao analisar diferentes propostas de sistematização da tectônica em seus elementos fundamentais observam-se relações e algumas divergências, especialmente terminológicas, no que se refere ao digital. Tendo em vista o objetivo de discutir, a partir de equivalências conceituais, a pertinência da tectônica diante dos processos computacionais, acredita-se que a investigação dessas relações auxiliou na elaboração de uma compreensão própria dos elementos fundamentais para este estudo teórico.

Diante, especialmente, da abordagem de Frampton (1996) da tectônica como a poética da arquitetura e das considerações acerca da tectônica nos novos processos computacionais de projeto, que indicam mudanças paradigmáticas nos modos de projetar e construir (CARPO, 2013, 2017; LEACH, 2014; OXMAN, 2017; PICON, 2020), entende-se que a relação entre as dimensões ontológicas e simbólicas da arquitetura é um ponto de convergência teórica. Assim, acredita-se que a noção da tectônica pode ser considerada a partir de três grandes áreas do ato, ou fazer, tectônico que se complementam ao se inter-relacionarem: **Qualidade** (enquanto adjetivo), **Fisicalidade** e **Processos**.

Para consolidar essa proposição, destacam-se os elementos inerentes à tectônica que compõem essas áreas (Figura 5): **Detalhe**, **Interação** e **Articulação** ligados ao aspecto qualitativo, poético e expressivo da arquitetura, relacionando-a aos contextos cultural e ambiental. **Estrutura**, **Material**, **Informação** e **Manipulação** referem-se à fisicalidade do fazer,

considerando as propriedades materiais desde o início do processo de projeto. **Construção** e **Fabricação** estão relacionados aos processos do fazer, desde a concepção até a realização, de modo que as técnicas utilizadas são determinantes nesses processos.



Fonte: Autoras.

Considerações finais

A noção da tectônica tem sido constantemente reavaliada na teoria da arquitetura desde o século XIX com Bötticher e Semper, que introduziram abordagens teóricas incorporando novas tecnologias e discussões filosóficas, antropológicas e artísticas. No século XX, Kenneth Frampton redefiniu a tectônica como a "poética da construção", influenciando teorizações digitais posteriores que consideraram novos materiais, métodos construtivos e lógicas de projeto computacionais. Este estudo investigou a pertinência de considerar a tectônica e seus elementos nos processos computacionais. Para isso, foi conduzida uma análise de artigos sobre novos processos computacionais, propondo discussões e diálogos entre os autores, e finalmente sistematizações. Embora sejam tentativas iniciais, são relevantes para entender as equivalências conceituais e observar a tectônica no contexto digital.

As contribuições teóricas de Frampton associadas às novas reflexões sobre materiais e métodos construtivos digitais indicam um cenário de mudanças paradigmáticas na arquitetura (CARPO, 2013, 2017; LEACH, 2014; OXMAN, 2017; PICON, 2020). Identificou-se que a relação entre as dimensões ontológicas e simbólicas da arquitetura é um ponto de convergência teórica. A partir disso, três grandes áreas do ato tectônico foram definidas: qualidade, fisicalidade e processos. Estas áreas são inerentes ao fazer arquitetônico e relacionam-se entre si, formando a base para a discussão teórica da tectônica digital.

No contexto da tectônica digital, os processos computacionais permitem uma exploração intensificada dos materiais e métodos construtivos desde o início do projeto. As ferramentas computacionais não são apenas "pranchetas eletrônicas", mas auxiliam na busca por soluções

através de processos algorítmicos e paramétricos, baseados na manipulação de dados variáveis e atributos mensuráveis (LEACH, 2014). Essas abordagens estabelecem a tectônica digital, descrevendo a incorporação de dados sobre materialidade aos processos computacionais, desde a geração até a fabricação (BALÍŃSKI; JANUSZKIEWICZ, 2016; SANTOS; PAOLETTI, 2020).

Apesar de algumas divergências terminológicas entre os estudiosos da tectônica digital, há uma convergência nas ideias centrais que relacionam qualidade, fisicalidade e processos. Estes elementos são fundamentais tanto na tectônica tradicional quanto na digital, refletindo a poética e expressividade arquitetônicas em um contexto contemporâneo de produção digital.

A pesquisa conclui que a matriz teórica da tectônica, conforme proposta por Frampton, pode ser mantida na produção digital e computacional contemporânea. Nos novos processos computacionais de projeto, como os generativos, algorítmicos e paramétricos, a exploração dos componentes materiais e construtivos desde o início intensifica a intencionalidade ontológica na produção arquitetônica. Embora as tentativas de sistematização da tectônica possam apresentar vieses, elas buscam acentuar as possibilidades tectônicas em uma arquitetura projetada e fabricada computacionalmente.

Estudos teóricos têm a tarefa de investigar e fomentar posturas críticas no contexto das novas práticas arquitetônicas, evitando definições rígidas que limitem diferentes interpretações e o desenvolvimento da teoria arquitetônica. Explorando um campo em constante transformação, a pesquisa contribui para a compreensão das inter-relações entre teoria e prática, fundamentais para o avanço da arquitetura contemporânea.

Agradecimento

Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG), Programa de Apoio a Instalações Multiusuários (APQ-00774-19).

Referências Bibliográficas

AL-ALWAN, H.; MAHMOOD, Y. B. The Connotation of Tectonics in Architectural Theory. In: The Fourth Scientific Conference for Engineering and Postgraduate Research, 2020, Bagdá. **Anais [...]**. Londres: IOP Publishing, 2020, p. 1-12.

AMARAL, I. Quase tudo que você queria saber sobre tectônica, mas tinha vergonha de perguntar. **Pós. Revista do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAUUSP**, v. 0, n. 26, p. 148, 2009.

- ANDERSSON, I. K.; KIRKEGAARD, P. H. A discussion of the term digital tectonics. **WIT Transactions on the Built Environment**, v. 90, n. Digital Architecture and Construction, p. 29–39, 2006.
- ANDRADE, R. P. **MATRIZES TECTÔNICAS da Arquitetura Moderna Brasileira 1940 - 1960**. Brasília: Universidade de Brasília, 2016.
- BALIŃSKI, G.; JANUSZKIEWICZ, K. Digital Tectonic Design as a New Approach to Architectural Design Methodology. In: WMCAUS 2016, 2016, Amsterdã. **Anais [...]**. Amsterdã, Elsevier Ltd, 2016, p. 1504-1508.
- BEESELEY, P.; SEEBOHM, T. Digital Tectonic Design. In: eCAADe 18, 2000, Weimar. **Anais [...]**. [s.l], 2000, p. 287-290.
- CAETANO, I.; SANTOS, L.; LEITÃO, A. Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design. **Frontiers of Architectural Research**, v. 9, n. 2, p. 287–300, 2020.
- CARPO, M. **The Digital Turn in Architecture 1992-2012**. Chichester: Wiley, 2013.
- CARPO, M. **The Second Digital Turn: Design Beyond Intelligence**. Cambridge, MA: The MIT Press, 2017.
- DEAMER, P. Detail, the Subject of the Object. **Praxis: journal of writing + building**, v. 1, p. 108–115, 2000.
- FRAMPTON, K. Rappel à l'ordre. Argumentos em favor da tectônica, 1990. In: NESBITT, K. (org.). **Uma nova agenda para a arquitetura: antologia teórica (1965-1995)**. São Paulo: Cosac Naify, 2006.
- FRAMPTON, K. **Studies in Tectonic Culture: The Poetics of Construction in Nineteenth and Twentieth Century Architecture**. Cambridge, MA: MIT Press, 1996.
- GAO, W.-P. Tectonics? A Case Study for Digital Free-Form Architecture. In: CAADRIA 9, 2004, Seul. **Anais [...]**. [s.l], 2004, p. 519-534.
- HVEJSEL, M. F.; BEIM, A.; BUNDGAARD, C. Tectonic Vocabulary and Materialization. **Nordic Journal of Architectural Research**, n. 3, p. 85–106, 2014.
- JABI, W. Digital tectonics: the intersection of the physical and the virtual. In: ACADIA 23, 2004, Ontario. **Anais [...]**. [s.l], 2004, p. 256-269.
- LEACH, N. Digital morphogenesis. **Architectural Design**, v. 79, n. 1, p. 32–37, 2009.
- LEACH, N. Parametrics Explained. **Next Generation Building**, v. 1, n. 1, p. 1–10, 2014.
- LIU, Y. T.; LIM, C. K. New tectonics: A preliminary framework involving classic and digital thinking. **Design Studies**, v. 27, n. 3, p. 267–307, 2006.
- MALLGRAVE, H. F. Gottfried Semper and Modern German Theory. In: MALLGRAVE, H. F.; BRESSANI, M.; CONTANDRIOPOULOS, C. (Eds.). **Companion to the History of Architecture**. 1. ed. Nova Jérsei, Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc., 2017. v. IIIp. 1–22.

- MITCHELL, J. W. Antitectonics: The Poetics of Virtuality. In: BECKMANN, J. (Ed.). **The virtual dimension: architecture, representation and crash culture**. [s.l.] Princeton Architectural Press, 1998. p. 205–217.
- NESBITT, K. **Uma Nova Agenda Para a Arquitetura**: Antologia Teórica 1965-1995. 1. ed. São Paulo: Cosac Naify, 2006.
- OXMAN, R. Informed tectonics in material-based design. **Design Studies**, v. 33, n. 5, p. 427–455, 2012.
- OXMAN, R. Thinking difference: Theories and models of parametric design thinking. **Design Studies**, v. 52, p. 4–39, 2017.
- PICON, A. Architecture, innovation and tradition. **Architectural Design**, v. 83, n. 1, p. 128–133, 2013.
- PICON, A. **The Materiality of Architecture**. Minneapolis: University of Minnesota Press, 2020.
- PUIG, R. J. F.; BRUSCATO, U. M. Teoria Da Tectônica : Do Tradicional Ao Digital. **Revista Brasileira de Expressão Gráfica**, v. 8, n. 2, p. 22–43, 2020.
- SÁNCHEZ VELASCO, V. E.; CASTRO SALGADO, S. A. Digital Fabrication: an Outlook from Digital Tectonics. In: XXIV SIGraDi, 2020, Medellín. **Anais [...]**. São Paulo, Blucher Proceedings, 2020, p. 3-8.
- SANTOS, D. M. DOS; PAOLETTI, I. Material-Based Design: Improving a Continuous Changing Praxis. In: XXIV SIGraDi 24, 2020, Medellín. **Anais [...]**. São Paulo, Blucher Proceedings, 2020, p. 17-22.
- SCHMIDT, A. M. D.; KIRKEGAARD, P. H. Navigating towards digital tectonic tools. In: V ACADIA, 2005, Savanna. **Anais [...]**. [s.l.], 2005, p. 114-127.
- SCHUMACHER, P. Tectonism in Architecture, Design and Fashion: Innovations in Digital Fabrication as Stylistic Drivers. **Architectural Design**, v. 87, n. 6, p. 106–113, 2017.
- SCHWARTZ, C. A Taxonomy of Architectural Tectonics. In: Building Technology Educators' Society, Des Moines, 2017. **Anais [...]**. Des Moines, Building Technology Educators' Society, 2017a, p. 179-186.
- SCHWARZER, M. Ontology and Representation in Karl Bötticher's Theory of Tectonics. **Journal of the Society of Architectural Historians**, v. 52, n. 3, p. 267–280, 1993.
- SCHWARZER, M. German Tectonics. In: MALLGRAVE, H. F.; BRESSANI, M.; CONTANDRIOPOULOS, C. (Eds.). **Companion to the History of Architecture**. 1ª ed. Nova Jérsei, Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc., 2017. v. IIIp. 1–13.
- SEKLER, E. F. Structure, Construction, Tectonics. In: KEPES, G. (Ed.). **Structure in Art and in science**. Nova Iorque: George Braziller, 1965. p. 89–95.
- VIANA, A. DE O. **Gottfried Semper e o Ornamento em Arquitetura**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2017.
- YAN, C.; YUAN, P. F. Beyond Embodiment: An Existential Project of Digital Tectonics in the Posthumanist Discourses. In: CAADRIA 26, 2021, Hong Kong. **Anais [...]**. Hong-Kong, CAADRIA, 2021, p. 91-100.