

## Modelos paramétricos e associativos para o projeto de quadras urbanas sustentáveis

JULIANA BELLO MILANEZ<sup>1</sup> e GABRIELA CELANI<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Universidade Estadual de Campinas.

<sup>1</sup>jbellomilanez@hotmail.com

<sup>2</sup>celani@unicamp.br, ORCID 0000-0001-5524-4748

**Resumo.** Esta pesquisa teve como objetivo discutir e propor o uso de modelos paramétricos e associativos para o projeto de edifícios e quadras urbanas visando a construção de cidades mais sustentáveis. A partir de uma revisão da literatura, foram identificados parâmetros de sustentabilidade, os quais foram aplicados em modelos paramétricos associativos. Como prova de conceito, foi modelado, com o software Rhinoceros 3D e seu plug-in Grasshopper, um plano de massa paramétrico de uma quadra urbana. Em seguida, foram geradas diferentes instâncias dessa quadra, com distintos parâmetros de entrada, para comparação de seu desempenho. Os resultados permitem inferir quais tipologias de quadras resultam em maior sustentabilidade sob aspectos como densidade habitacional, intensidade de uso, porcentagem de área verde em relação à população prevista, e potencial de geração de energia solar e de captação de águas pluviais em relação ao consumo previsto.

**Keywords/Palavras-chave:** Sustentabilidade urbana, modelagem associativa, modelagem paramétrica, urbanismo paramétrico, parâmetros de sustentabilidade.

### 1 Introdução

Existe, na atualidade, um consenso de que o padrão urbano de crescimento baseado no espraiamento, muito presente em cidades brasileiras e norte-americanas, não é um modelo sustentável e precisa ser repensado (DUANY e TALEN, 2001). Para isso, os códigos urbanos de zoneamento e de ocupação do solo urbano precisam ser reformulados, pois esse tipo de zoneamento tende a estimular o uso do automóvel particular e a evitar o adensamento, além de se mostrar como um entrave para um design inovador que atenda democraticamente à diversidade de pessoas e de contextos (CAVALCANTI, 2021). Como reforçam Duany e Talen (2001, p. 1452), a maioria dos códigos de zoneamento “em vez de orientar proativamente o padrão urbano, restringem os tipos de desenvolvimento que podem ocorrer”.

Esta pesquisa teve como objetivo discutir e propor o uso de modelos paramétricos e associativos para o projeto de edifícios em quadras urbanas visando a construção de

cidades mais sustentáveis. Para isso, foram utilizadas as ferramentas paramétricas de análise e simulação Rhinoceros 3D e seu plug-in Grasshopper, que facilitam as abordagens criativas e simulações de desempenho no processo de projeto.

A pesquisa teve como objetivos específicos:

- Identificar e estudar artigos científicos que apresentem exemplos de aplicação de modelos paramétricos e associativos no desenvolvimento de edifícios e quadras urbanas sustentáveis;
- Identificar, a partir da literatura levantada, parâmetros de sustentabilidade utilizados em modelos paramétricos, bem como os valores ideais e algoritmos de cálculo;
- Desenvolver um exercício de implementação de um modelo paramétrico de plano de massas de quadra urbana sustentável;
- Gerar simulações que permitam avaliar a qualidade e eficiência do modelo criado, seguindo critérios a partir dos parâmetros de sustentabilidade acima identificados;
- Criar uma tabela que permita comparar os resultados de desempenho de diferentes tipologias de quadras em termos de alguns parâmetros de sustentabilidade ambiental.

## 2 Materiais e Métodos

A primeira etapa da pesquisa consistiu na leitura de artigos a respeito do uso de softwares e modelos paramétricos e associativos no desenvolvimento de edifícios e cidades sustentáveis, tendo em vista o papel promissor que estas ferramentas desempenham na integração do conceito de sustentabilidade ao processo de design. A etapa seguinte consistiu em levantar e selecionar parâmetros de sustentabilidade passíveis de serem utilizados em modelos paramétricos, identificando seus valores ideais e algoritmos de cálculo.

Alguns dos parâmetros foram obtidos na oficina A Quadra Urbana do Futuro<sup>1</sup>, da plataforma Digital Futures, cujo site oferece informações a respeito de valores ideais de parâmetros e fórmulas simplificadas para implementação no modelo paramétrico no software Rhinoceros 3D e seu plug-in Grasshopper nas seguintes áreas: urbanismo sustentável, sistemas de drenagem, conforto ambiental, mídias móveis e espaços urbanos, energia fotovoltaica, drenagem urbana, mobilidade ativa, ilhas de calor, quadras verdes compactas e diversidade urbana.

Os parâmetros de cada área mencionados acima são valores ideais que atuam como referências para comparações e relações na busca do melhor desempenho. Por exemplo, em relação à infra-estrutura de quadras verdes, os parâmetros podem indicar a porcentagem mínima recomendada de áreas verdes em uma quadra urbana e a relação entre as manchas verdes; em relação ao uso de fontes de energia sustentáveis, pode ser simulada a potência energética gerada a partir de uma determinada área disponibilizada para a instalação de painéis fotovoltaicos com uma orientação solar específica, e o quanto a mesma poderá suprir a energia elétrica consumida; e assim por diante.

---

<sup>1</sup> Ver <https://sites.google.com/unicamp.br/aquadradofuturo>.

Para a realização da etapa de modelagem foi utilizado o programa Rhinoceros 3D e seu plug-in Grasshopper, instalados em um notebook Dell Inspiron 14 Série 500. A implementação teve início começar com a modelagem paramétrica de um conjunto de edifícios em uma quadra vinculado a um único parâmetro; em seguida foram implementados novos parâmetros, que foram então ligados ao primeiro maneira associativa, estabelecendo uma relação de dependência entre todos, e assim sucessivamente, em nível crescente de complexidade.

O modelo final, com diferentes parâmetros, foi utilizado para elaborar uma tabela comparativa com os resultados de desempenho relacionado à sustentabilidade de diferentes modos de ocupação da quadra.

### 3 Revisão da literatura

A primeira etapa da pesquisa consistiu na leitura de artigos e manuais disponíveis em bancos de dados online a respeito do uso de softwares e modelos paramétricos no desenvolvimento de edificações e cidades sustentáveis. Nesses casos, o design computacional pode exercer uma importante função de apoio ao arquiteto, no qual conhecimentos e habilidades podem ser apoiados com respostas quantitativas e visuais concretas, levando a respostas que não poderiam ser imaginadas sem o seu auxílio (DERIX; IZAKI, 2014).

Dentre os artigos analisados, destaca-se o de Duarte et al. (2012), que propõem um método sistemático para a formulação, geração e avaliação de desenhos urbanos com o uso de sistemas paramétricos voltados à otimização. Outros trabalhos, como os de Lima, Brown e Duarte (2022a, 2022b e 2021) e o de Lima (2017), propõem métodos para a distribuição das funções em uma cidade, sua acessibilidade e caminhabilidade, contribuindo com a sustentabilidade por meio da redução da dependência na mobilidade motorizada. Makki (2019) utiliza algoritmos evolutivos para gerar tecidos urbanos otimizados, explorando de forma computacional um espaço de busca de soluções que é muito grande para uma abordagem manual. O autor defende que a variação de quadras aumenta o potencial do tecido urbano no qual se inserem para se adaptar às transformações ambientais e climáticas, ou seja, aumentando sua resiliência, além de colaborar para padrões de distinção espacial que são assimilados com a percepção da cultura urbana e qualidades que tornam a cidade um bom lugar para se viver (MAKKI et al., 2019). Os experimentos analisados demonstram vantagens da aplicação de modelos adaptáveis e de ferramentas de design paramétrico, que permitem “variação de atributos morfológicos ao longo do tecido urbano, afastando-se da cidade universal do século 20 para uma que está mais bem equipada para o rápido ambiente e desafios climáticos do século 21” (MAKKI et al., 2019, p. 33)

Ademais, a leitura do livro *The Changing Shape of Practice: Integrating research and design into architecture* (2016), por Michael Hensel e Fredrik Nilsson, foi fundamental para compreender o papel promissor, no cenário mundial da arquitetura, que estas ferramentas computacionais desempenham na integração do conceito de sustentabilidade ao processo de design. A sua temática gira em torno da necessidade de impulsionar a integração entre pesquisa e prática na arquitetura, devido à crescente complexidade dos

projetos arquitetônicos, da urgência de novos conhecimentos quanto à sustentabilidade, e o rápido desenvolvimento das tecnologias digitais. No livro, são abordados diferentes escritórios de arquitetura e urbanismo renomados mundialmente, descrevendo suas práticas atuais e percepções para com a tecnologia e sua relação com os métodos de projeto, pesquisa e design.

John Haymaker, diretor de pesquisa da Perkins & Will, escritório global de arquitetura com ênfase em sustentabilidade, reforça a ideia de que o design computacional é um campo em acelerado desenvolvimento de pesquisa e processo de design, “que permite aos designers gerar, analisar e documentar design usando técnicas computacionais poderosas para obter resultados que de outra forma seriam difíceis ou impossíveis de obter” (HENSEL; NILSSON, 2016, p. 15).

Outro escritório discutido no livro é o PLP Architecture, escritório de arquitetura e pesquisa em Londres, Inglaterra. O foco da pesquisa no PLP é em tecnologias emergentes, que mudam o contexto no qual a arquitetura é praticada. Este foco compreende desde ferramentas de design digital como modelagem 3D e modelagem paramétrica, até o impacto geral da tecnologia digital na sociedade. Lars Hesselgren, diretor de pesquisa do PLP, explica que o aumento da representação digital em projetos com análises e simulações levou a um novo paradigma do “projeto baseado em desempenho” ou “projeto performativo”. Neste tipo de abordagem, as metas de desempenho são desenvolvidas durante os estágios iniciais do projeto - devido à rápida progressão digital e de ferramentas computacionais -, pois é nesta fase que as decisões de massa são tomadas (localização, altura e forma da construção), que são vitais para o desempenho e vida útil do edifício, assim como seu impacto na área circundante (HENSEL; NILSSON, 2016).

O escritório dinamarquês 3XN, também apresentado no livro, é um dos escritórios internacionais de design que mais desenvolveram grupos de pesquisa com foco em estratégias de sustentabilidade combinadas com novas tecnologias de design computacional e inovação em materiais. Kasper Guldager, sócio fundador da 3XN justifica que a indústria de construção vem se adaptando ao cliente e às pressões regulatórias para redução das emissões de carbono, do uso e desperdício de energia; “para alcançar mudanças duradouras, esses parâmetros precisam fazer parte do processo de design e da forma como os projetos são concebidos e comunicados” (HENSEL; NILSSON, 2016, p. 86), fazendo relação com o projeto baseado em desempenho.

Por fim, um importante escritório a ser destacado dentre os presentes no livro é o SpaceScape (2021), escritório sueco que investiga a forma espacial das cidades e sua relação com uma grande variedade de processos urbanos. Lars Marcus, sócio fundador, explica que, do ponto de vista da pesquisa arquitetônica e urbanística, a problemática atual é que muitas tarefas são pré definidas, ou seja, as soluções escolhidas para análises já foram fornecidas e não testam o campo de possibilidades suficientemente. Em suas palavras, trata-se de expandir o campo de possibilidades, limites nem sempre explorados nas práticas convencionais: “há uma tendência nas soluções arquitetônicas de seguir certas tendências, razão pela qual muitas vezes faltam as soluções que realmente tentam algo diferente” (HENSEL; NILSSON, 2016, p. 158). O escritório tem como pontos de partida a análise, a estratégia e o diálogo, e desenvolveu nos últimos anos diversos planos urbanísticos e materiais para novos bairros e projetos abertos.

#### 4 Parâmetros de sustentabilidade

Foram levantados e selecionados parâmetros de sustentabilidade passíveis de serem utilizados em modelos paramétricos, especificando seus valores ideais e, em alguns casos, algoritmos de cálculo. A participação das autoras no workshop “A Quadra Urbana do Futuro” da plataforma Digital Futures, realizado entre 27 de junho e 3 de julho de 2020, contribuiu previamente para o contato com especialistas de áreas relacionadas a cidades sustentáveis e para a obtenção de informações a respeito de valores ideais de parâmetros e fórmulas simplificadas para aplicação no modelo paramétrico no software Rhinoceros 3D e seu plug-in Grasshopper. Neste workshop, foram discutidas as áreas de urbanismo sustentável (FARR, 2007), sistemas de drenagem, conforto ambiental, qualidade de espaços (públicos ou privados) de acesso público, energia fotovoltaica (geometricamente ligada à forma dos edifício), drenagem urbana, mobilidade ativa, ilhas de calor, quadras verdes compactas e diversidade urbana. Dentre as áreas apresentadas, algumas se destacaram nesta etapa de seleção de parâmetros de sustentabilidade por identificarem valores ideais de forma quantificável e, portanto, mais adequados para serem inseridos e avaliados no modelo paramétrico através de dados numéricos, em um primeiro momento. Destacaram-se para esta etapa as seguintes áreas: qualidade de espaços (públicos ou privados) de acesso público, abordada pelo especialista Gustavo Campos de Faria (2020), quadras verdes e compactas, discutida pela especialista Patrícia Sanches (2020) e, por fim, diversidade urbana, abordada por Robson Canuto (2009).

Foram também levantados parâmetros de certificações de sustentabilidade, por meio de artigos científicos e manuais. Entre eles, é de grande relevância o manual SpaceScape City Measures (2021), de autoria do escritório sueco de pesquisa e design urbano SpaceScape. O relatório foca o ambiente urbano, tanto em espaços públicos como privados, e está dividido em quatro temas: espaços abertos públicos, espaços de rua, espaços abertos privados de uso público e forma construída. Para cada tema, são apresentados um conjunto de medidas, diretrizes e métodos analíticos, desenvolvidos no âmbito de pesquisas ou comprovados na prática da construção urbana do escritório, apoiando um melhor desenvolvimento urbano, como valores ideais de taxa de ocupação e coeficiente de aproveitamento, e porcentagens referenciais para áreas de espaços abertos, por exemplo. Em um contexto no qual arquitetos e engenheiros são cada vez mais desafiados a atender demandas de sustentabilidade e de metas ambientais, os sistemas de certificação de edifícios verdes têm sido utilizados como guias de projeto em direção a um objetivo de design ou de desempenho, bem como ferramentas de verificação para investidores e compradores (JALAEI; JRADE, 2015). Assim, foi importante realizar um aprofundamento no estudo de certificações de edificações e cidades verdes, entre elas o Guia AQUA Bairro, certificação criada originalmente na França e depois adaptada para o Brasil; a Norma Brasileira ABNT NBR ISO 37122 (Cidades e comunidades sustentáveis - Indicadores para cidades inteligentes); a certificação inglesa Breeam (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), mais especificamente os manuais Breeam Communities e Breeam UK New Constructions; e, por fim, a certificação norte-americana LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), por meio do manual LEED v4 for Neighborhood Development (2015). A Tabela 1 apresenta uma síntese dos parâmetros identificados e dos valores recomendados.

**Tabela 1.** Parâmetros de sustentabilidade e valores recomendados

PARÂMETROS	SpaceScape City Measures	Patrícia Sanches (Quadras Verdes Compactas)	Gustavo Campos de Faria (Mídias Móveis e Espaços Urbanos)	Robson Canuto (Diversidade Urbana)	LEED v4 for Neighborhood Development
<b>TO: Taxa de Ocupação (Cobertura de Construção)</b>	Máximo 40%	Máximo 55%			
<b>CA: Coeficiente de Aproveitamento</b>	- Mínimo de 0,75 em nível distrital - Mínimo de 2,0 em nível da quadra	Mínimo 1,5			
<b>Densidade Domiciliar (Densidade Habitacional)</b>		Mínimo 220 domicílios/ha			Mínimo 17,5 unidades habitacionais por hectare de terreno edificável disponível para uso residencial
<b>Densidade Populacional</b>		Mínimo 390 habitantes/ha		Densidade baixa = 16 a 50 hab/ha Densidade média = 51 a 150 hab/ha Densidade alta = 151 a 350 hab/ha Densidade muito alta = > 350 hab/ha	
<b>Uso Misto</b>	30-70% de uso comercial na área total da quadra		Área comercial/área total = 20% do térreo (adequado) ou 40% do térreo (ideal)		Incluir um componente residencial equivalente a pelo menos 30% da área total do projeto ou edifício
<b>Número de Pavimentos Edificações</b>		Média 7 pavimentos (incluso térreo), mínimo 4 e máximo 11	1 a 2 pav (alta interação); 3 pav (intermediário); 5 pav (limiar de interação); 10 pav (baixa interação); 11+ (baixa interação)		
<b>Tamanho Médio dos Domicílios</b>		90m <sup>2</sup> (incluindo circulação de 10 a 15% da área do pavimento)			
<b>Fachada Permeável (Densidade de Entrada para Rua)</b>	Mínimo 5 entradas por 100 m de comprimento da rua				90% dos novos edifícios têm uma entrada funcional para a rede de circulação ou outro espaço público, como um parque ou praça, mas não um estacionamento
<b>ESPAÇO VERDE E ESPAÇO PÚBLICO</b>	<b>Espaço Público Aberto ("Área Livre")</b>	- 10m <sup>2</sup> /hab - 15% da área total			
	<b>Espaço Público Verde (Cobertura Vegetal)</b>	10% da área total	- Percentual de Cobertura Arbórea mínimo = 35% - Tamanho médio da mancha = 240 m <sup>2</sup>	Área verde/habitante = 9m <sup>2</sup> (adequado) ou 36m <sup>2</sup> (ideal)	
	<b>Cobertura Arbórea</b>		- Percentual de Cobertura Arbórea mínimo = 25% - Tamanho médio da mancha = 175 m <sup>2</sup>		Fornecer árvores em intervalos de não mais de 12 metros (isentos de calçadas) ao longo de pelo menos 60% do comprimento total da quadra
	<b>Espaço Aberto Privado</b>	Mínimo 40% da área total da quadra de espaço privado aberto			
	<b>Espaço Verde Privado</b>	Mínimo 25% da área total da quadra de espaço verde			
<b>ESPAÇO DA RUA</b>	<b>Área de Rua</b>	20-30% da área total			
	<b>Dimensões da Quadra</b>	Aproximadamente 84x84m		100x100m	
	<b>Perfil de Rua</b>	Máximo 50% da rua seção para veículos motorizados. Largura mínima calçada = 3m		Área viária/área total = 30% (adequado) ou 25% sistemas automotivos e 74% sistemas sustentáveis e pedestres (ideal)	

**Fonte.** Elaborado pelas autoras.

Entre as certificações analisadas, destaca-se o manual LEED v4 (2015) por concentrar parâmetros quantitativos importantes e passíveis de serem avaliados no modelo paramétrico, como um valor mínimo de unidades habitacionais por hectare ou uma porcentagem equivalente ao tipo de uso do solo em cada projeto, por exemplo.

Dentre as informações reunidas na Tabela 1, foram selecionados parâmetros para a etapa seguinte da pesquisa, utilizando-se como critério sua aplicabilidade ao código computacional para a modelagem paramétrica das quadras urbanas. Os parâmetros foram subdivididos nas categorias de “edificações”, “área verde e espaço público” e “espaço da rua” (este último comprehende apenas o leito carroçável e a faixa de calçada pública). Essa organização facilitou o entendimento dos valores considerados ideais em cada parâmetro a partir de sua comparação com outras fontes, evidenciando, até mesmo, as divergências de recomendações entre diferentes países e contextos.

Embora não tenha sido possível extrair parâmetros específicos para o modelo computacional de todos os documentos analisados, por não se tratar sempre de parâmetros quantificáveis, todo o material estudado foi essencial para um melhor entendimento a respeito do tema da sustentabilidade e aprofundamento nos critérios e métodos analíticos das certificações de edificações e cidades verdes.

## 5 Estudo de aplicação

A partir dos dados organizados na tabela de parâmetros de sustentabilidade e valores recomendados, foi possível dar início à aplicação dos primeiros parâmetros ao modelo de plano de massas de quadra urbana sustentável, de forma gradual. Para esta etapa de modelagem digital fez-se necessário o uso do programa Rhinoceros 3D 6 e seu plug-in Grasshopper de programação visual e modelagem paramétrica. Este processo de modelagem paramétrica comprehende uma nova forma de abordar o processo de projeto por meio da capacidade de controlar variáveis e adaptar os designs, permitindo a formulação de diversas soluções e cenários.

Como define Oxman (2006), a “modelagem associativa” é um modelo baseado em processos paramétricos que exploram a geometria associativa, pela qual as relações entre diferentes objetos paramétricos são descritas, compondo interdependências entre os mesmos. O processo de planejamento em um software associativo é, portanto, baseado em um encadeamento de definições que se inicia com a seleção dos parâmetros, alterando seus valores de acordo com a necessidade. Quando um valor de parâmetro é alterado, uma adaptação imediata é manifestada em todos os componentes. Este poder combinatório de mudanças viabiliza a possibilidade de geração de um número muito grande de cenários facilmente controlados por faixas de valores paramétricos e regras pré-estabelecidas pelo arquiteto (NAZIM; JOYCE, 2019). Assim, o modelo paramétrico associativo permite um alto grau de flexibilidade, uma vez que os cenários de projeto desenvolvidos para as quadras urbanas sustentáveis podem ser alterados de forma controlada, e a geometria do edifício e das quadras é remodelada automaticamente.

A criação do código computacional deu-se em etapas, iniciando-se com os componentes geradores da geometria do desenho das quadras urbanas. Para tal, utilizou-se como base um cluster (agrupamento de componentes) responsável por estabelecer uma grade de

estrutura viária de quadras e calçadas, disponibilizado no workshop A Quadra Urbana do Futuro. Para a composição do plano de massas de uma quadra-tipo de cidade sustentável, foi escolhida uma grade 3x3, com uma quadra central principal a ser analisada e oito quadras de entorno. Neste primeiro momento da pesquisa, estas quadras de entorno são quadras genéricas que apenas compreendem a formação de um cenário urbano e não têm influência direta sobre o plano de massas da quadra principal. Em um próximo momento previsto da pesquisa, na fase de simulações, as quadras de entorno poderão colaborar para um contexto mais realista de cidade, causando maiores impactos na quadra principal, como possível sombreamento nas simulações de incidência solar e diminuição da geração de energia fotovoltaica, por exemplo.

De acordo com os dados levantados, a recomendação é de que as quadras sejam quadradas, portanto adotou-se o parâmetro de quadra 100x100 metros, sugerido por Robson (2009), medida de eixo a eixo de rua. Em relação às dimensões da rua, a Lei Complementar Nº 207, de 20 de dezembro de 2018 que dispõe sobre a demarcação e ampliação do perímetro urbano em Campinas, em seu Capítulo II, Artigo 14, estipula a largura mínima de 14 metros para o sistema viário, contabilizados de testada de lote a testada de lote. Optou-se, então, pela modelagem de vias equivalentes a vias coletoras, seguindo os parâmetros indicados por Noronha (2020) e pelo guia Designing Walkable Urban Thoroughfares do Institute of Transportation Engineers (2021) (ITE), que incluem duas faixas de tráfego (definidas duas faixas de 3 m cada), faixas de estacionamento dos dois lados da rua (definidas duas faixas de 2,5 m cada), uma faixa de bicicleta (definida com 1,2 m) e calçadas largas (definidas com 3,9 m), totalizando 20 metros e respeitando o parâmetro do manual SpaceScape City Measures (2021) que estipula que a área de rua não pode ultrapassar 30% da área total.

O trecho subsequente do código é responsável por gerar os volumes do plano de massa dos edifícios da quadra. A partir da alteração dos valores dos parâmetros de entrada, controla-se a profundidade dos edifícios, o número mínimo e máximo de pavimentos, e a altura do pé direito - este último fixado como 3 metros de altura para a pesquisa. Com base nas alterações destas variáveis e da criação de recortes na volumetria, é possível a elaboração de cenários com diferentes tipologias de quadras.

Em seguida, já com os volumes do plano de massas formados, é realizada a etapa de cálculo de áreas. O código nos dá o resultado da área da quadra; da área total construída, a partir da somatória da área de cada pavimento; da área do pavimento térreo; e da área livre, que é a subtração da área da quadra pela área do pavimento térreo. Também é feita uma aproximação da área permeável de cobertura vegetal, calculada a partir de um buffer de 4 metros do perímetro dos pátios internos das quadras. Estes resultados são, então, utilizados como valores de entrada para o cálculo da taxa de ocupação (TO: razão entre área de projeção dos edifícios e a área da quadra multiplicada por 100), coeficiente de aproveitamento (CA: razão da área construída total pela área da quadra), e porcentagem de área livre e de área verde em relação à área da quadra.

Para o cálculo das densidades, é necessária a realização de algumas etapas específicas. Primeiramente, define-se quantos andares dos edifícios serão de uso residencial e quantos serão de uso não residencial (entre serviços, comércio, outros). Com estas informações, o código nos fornece a área total residencial e a área total não residencial. Em seguida, é feita a definição do valor ideal do parâmetro de área média dos domicílios. Para a pesquisa, a área dos domicílios foi determinada como 90 m<sup>2</sup>, incluindo a área de

circulação de 10 a 15% da área do pavimento. A partir da divisão da área total residencial pela área média dos domicílios, é possível obter o número de domicílios. Com isto, para uma previsão da quantidade de moradores, multiplica-se o número de domicílios por uma média de moradores por habitação que, no caso do estudo, foi definido como 3,1 moradores por habitação com base no Censo 2010 do IBGE. Também é feita uma estimativa de ocupantes para o uso não residencial a partir do valor de 0,14 pessoas por m<sup>2</sup> (RUZICKI, 2016) multiplicado pela respectiva área. Finalmente, dividindo o número de domicílios pela área total da quadra, tem-se a densidade domiciliar líquida, convertida para domicílios por hectare; com a divisão da quantidade de moradores pela área da quadra, tem-se a densidade populacional líquida, convertida para habitantes por hectare; e dividindo a soma do número de moradores mais o número de ocupantes de áreas não residenciais pela área da quadra, tem-se a densidade horária comercial líquida, em pessoas por hectare, que nos revela o fluxo total de pessoas em horários comerciais.

A compreensão destas diferentes densidades é fundamental, uma vez que a sustentabilidade no espaço urbano perpassa pelo debate sobre sua densidade como imposição morfológica nas cidades, por ser um dos principais instrumentos de monitoramento e controle ocupacional e espacial (SILVA, 2016). A densidade, juntamente à morfologia, determina o custo benefício de infraestrutura urbana, bem como o nível de acessibilidade, proximidade ao emprego e acesso à habitação. Assim sendo, como complementa Silva (2016), “a eficiência em infraestrutura e no uso e ocupação do solo urbano em sinergia com as disponibilidades e suportes ambientais do sistema-entorno são pontos vitais no processo de planejamento e gestão de cidades sustentáveis”.

## 6 Elaboração de cenários

Após a criação do código paramétrico associativo, definiu-se a metodologia para a avaliação e organização dos cenários de quadras urbanas a serem modelados. Logo, com fundamento nos conceitos estudados, estipulou-se um procedimento analítico experimental em forma de tabela, a partir da comparação dos cenários através dos valores ideais de parâmetros de sustentabilidade.

Uma referência relevante para esta etapa foi o baralho de cartas da editora espanhola de arquitetura a+t architecture. A editora tem como objetivo divulgar suas pesquisas sobre habitação coletiva, densidade, usos mistos e espaço público, e as cartas fazem parte de uma série sobre densidade urbana, apresentando diferentes tipologias de quadras e suas respectivas áreas, densidades, coeficientes de aproveitamento e taxas de ocupação, além de evidenciar a tendência ao projeto da quadra como unidade mínima de desenho, em oposição ao lote individual como unidade mínima. De maneira semelhante, o site Collective Housing Atlas (2021) também contribuiu para o repertório de diferentes tipos e referências de quadras, que são agrupadas conforme suas tipologias, e fornecem dados pertinentes sobre os edifícios como dimensões, orientação e morfologia.

Primeiramente, para a delimitação das diferentes tipologias de quadras a serem analisadas e comparadas entre si na pesquisa, utilizou-se como base os tipos investigados por Sanches (2020). Foram selecionadas três tipologias consideradas mais relevantes, tanto no contexto internacional como no contexto brasileiro: tipologia vertical de torres isoladas, tipologia perimetral, e tipologia perimetral semi aberta. Estes tipos são frutos de

lógicas opostas de morfologia: o tipo vertical origina-se de uma composição e controle de normas baseado no lote como unidade mínima para o desenho urbano; os dois últimos (perimetral e perimetral semi aberta), por sua vez, derivam de uma lógica de desenho a partir da quadra como unidade mínima, ou seja, “os regramentos de ocupação do solo vão além do lote, estabelecendo relações entre os edifícios e entorno, e trazendo unidade à quadra” (SANCHES, 2020, p. 41).

A tipologia vertical de quadras conta com habitações multifamiliares do tipo torres isoladas no lote, segue normas de recuos em todos os lados do lote, e é encontrada em inúmeras cidades brasileiras de médio a grande porte, como em São Paulo e Campinas. A tipologia perimetral é definida como uma quadra fechada por edificações perimetrais, formando um pátio interno comum, normalmente ajardinados, e podem oferecer equipamentos para os moradores, muito comum em países europeus, como na Alemanha. A tipologia perimetral semi aberta conta com edifícios semi contínuos, com interrupções que permitem maior fruição das áreas internas comuns e maior conexão com a rua e espaços públicos exteriores, encontrada em Berlim, por exemplo.

Em seguida, para a definição da metodologia de comparação entre os diferentes tipos de quadras, levou-se em consideração o fato de que, na legislação das cidades, o coeficiente de aproveitamento (CA), estipulado em seu valor máximo a depender do zoneamento, é um dado de entrada básico e um fator restritivo importante, uma vez que os empreendedores têm interesse em explorar o maior potencial construtivo do lote, visando sempre a lucratividade. Dessa forma, para comparar três tipologias distintas, a comparação mais justa precisaria ter como ponto de partida o mesmo CA para as três. Tendo em vista que, normalmente, o CA máximo permitido em áreas urbanas centrais é de 4, estipulou-se para a pesquisa cenários com coeficientes de aproveitamento de 2, 3 e 4.

Como parâmetros de entrada pré definidos, também foram estabelecidas três formas para a constituição dos edifícios: um cenário com a altura única máxima possível para os edifícios respeitando o CA determinado; um cenário com a altura única mínima possível para os edifícios respeitando o CA determinado; e um cenário com edifícios escalonados. Este último tipo de edificação consiste em um edifício com deslocamento ao longo dos pavimentos, de modo a formar terraços escalonados, criando espaço para vegetação e varandas privativas, que muitas vezes podem proporcionar maior aproveitamento da incidência solar, como é o caso do Sluishuis, um edifício sustentável de uso misto em Amsterdã, projetado por Bjarke Ingels Group (BIG) e a Barcode Architects. O critério de escalonamento para a criação do plano de massas foi realizar o escalonamento a partir de um canto da quadra até o canto oposto em diagonal. Neste primeiro momento da pesquisa, a orientação solar ainda não foi levada em conta, pois este fator será relevante apenas na próxima fase de simulações, na qual a orientação da quadra será ajustada de forma a propiciar melhor aproveitamento solar para determinada forma de escalonamento. A partir destes parâmetros de entrada fixos (CAs específicos e três formas de constituição dos edifícios) para cada cenário urbano, outros parâmetros de entrada geradores do plano de massas tiveram seus valores alterados em conjunto a partir da experimentação por tentativas no modelo computacional; são eles: número de pavimentos; profundidade do edifício; e número de andares não residenciais.

O número de pavimentos e a profundidade do edifício foram regulados simultaneamente de maneira a resultar no valor mais próximo possível do coeficiente de aproveitamento

estabelecido para aquele cenário, pois coeficiente é mais alto à medida que a quadra compreende uma área construída maior, seja em extensão (horizontal) ou em número de pavimentos (vertical) (SANCHES, 2020).

Uma vez que estamos considerando que o experimento se aplica a áreas centrais densas, onde tende a haver uma concentração de comércio e serviços, para a definição do número de pavimentos não residenciais, utilizou-se como base o valor mínimo de 30% de uso não residencial (misto) na quadra. Os edifícios de uso misto combinam dois ou mais usos, e conferem maior vitalidade urbana ao proporcionar mais variedade e densidade, melhor integração com os serviços urbanos e mais flexibilidade para se adaptar a mudanças de necessidades. No caso da tipologia de torres verticais, por ser uma tipologia tipicamente exclusivamente residencial e com afastamentos, o seu térreo, normalmente ocupado por hall e portaria, foi considerado como uma área sem habitação e portanto não foi levado em conta para o cálculo de densidade; e tampouco entrou para o cálculo de porcentagem de uso misto, pois não se configura como uso comercial ou de serviços. Nesse caso, o mais provável é que o comércio e serviços tendam a se concentrar em quadras específicas. Já nas tipologias perimetral e perimetral semi aberta, ambas tiveram como padrão o térreo comercial, e, em alguns casos, outros pavimentos também foram estipulados como uso não residencial, a partir da definição do uso misto mínimo de 30% e de um parâmetro de densidade populacional mínimo.

A partir da alteração dos valores destes parâmetros de entrada (input) mencionados, temos o plano de massas da quadra e os valores resultantes de saída (output), a partir dos quais podemos avaliar se a quadra atende ou não atende as recomendações para os parâmetros de sustentabilidade identificados.

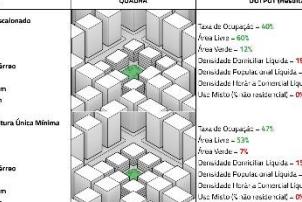
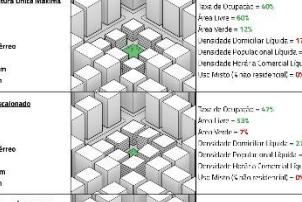
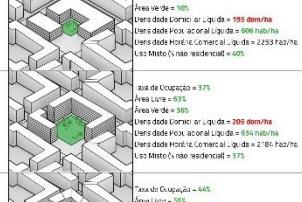
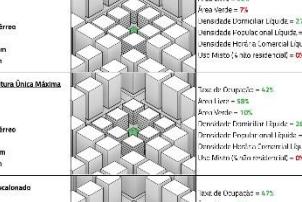
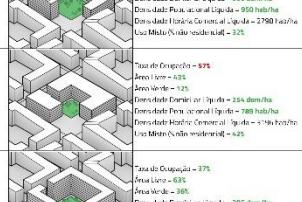
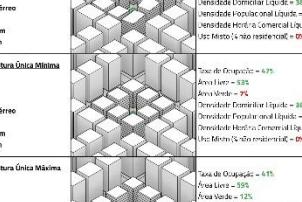
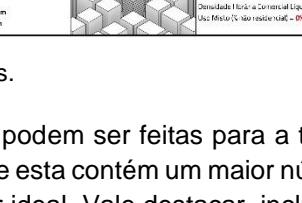
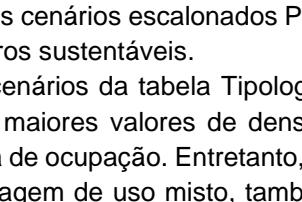
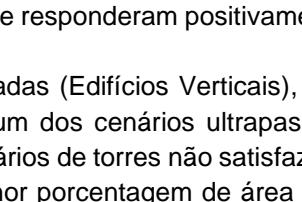
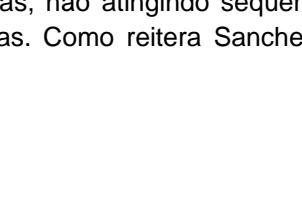
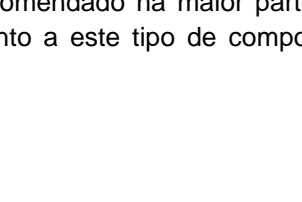
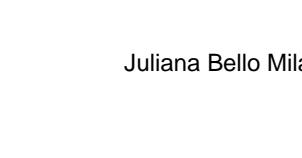
## 7 Resultados

Os cenários gerados foram sistematizados em forma de tabelas comparativas das três tipologias de quadras estudadas: perimetral, perimetral semi-aberta e com torres isoladas. Apenas as duas últimas são apresentadas na Tabela 2, por questões de restrição de espaço. Na célula de entrada, os parâmetros sublinhados são os parâmetros fixos, descritos anteriormente, e os parâmetros não sublinhados são os parâmetros que tiveram seus valores definidos a partir da experimentação no modelo computacional, como mencionado. Na célula de resultado, temos os valores resultantes de cada parâmetro para a quadra em questão; apresentados na cor verde caso atendam os valores ideais de sustentabilidade, e na cor vermelha caso não atendam.

Ao analisar os cenários da tabela Tipologia Perimetral, percebe-se que, de modo geral, as quadras perimetrais apresentaram um bom desempenho nos resultados. O valor ideal de densidade domiciliar foi atingido apenas nos cenários com CA 4, ficando abaixo do recomendado em todos os outros cenários, porém, ainda sim, a densidade populacional encontrou-se dentro do valor ideal em todos os cenários. A taxa de ocupação ideal foi excedida somente nos cenário P-5 e P-8, com CA de 3 e 4, respectivamente. Isto acontece porque ambos são cenários com parâmetro pré definido de altura mínima, portanto, para alcançar valores altos de CA sem expandir verticalmente a área construída, foi necessário uma maior extensão horizontal, ou seja maior profundidade do edifício, ocasionando uma

taxa de ocupação excessiva. Além disso, devido à sua configuração com pátio interno, a porcentagem de área verde para essa tipologia atendeu e ficou acima do recomendado em todos os cenários.

**Tabela 2.** Cenários de quadras perimetrais semi-abertas (E) e com torres isoladas (D)

TIPOLOGIA PERIMETRAL SEMI-ABERTO		TIPOLOGIA TORRES ISOLADAS (Edifícios Verticais)	
INPUT (Entrada)	QUADRA	INPUT (Entrada)	QUADRA
<b>CENÁRIO PS-1</b> Área Línea ou Escalonada Escalonada Número Pavimentos: 9 IP: número de residências: térreo + 1 Profundidade Edifício: 10 m		<b>CENÁRIO T-1</b> Área Línea ou Escalonada Escalonada Número Pavimentos: 4 a 8 IP: número de residências: térreo + 1 Profundidade Edifício: 5 m	
<b>CENÁRIO PS-2</b> Área Línea ou Escalonada Altura Única Mínima Número Pavimentos: 4 IP: número de residências: térreo + 1 Profundidade Edifício: 10 m		<b>CENÁRIO T-2</b> Área Línea ou Escalonada Altura Única Mínima Número Pavimentos: 4 IP: número de residências: térreo + 1 Profundidade Edifício: 5 m	
<b>CENÁRIO PS-3</b> Área Línea ou Escalonada Altura Única Máxima Número Pavimentos: 6 IP: número de residências: térreo + 1 Profundidade Edifício: 11 m		<b>CENÁRIO T-3</b> Área Línea ou Escalonada Altura Única Máxima Número Pavimentos: 5 IP: número de residências: térreo + 1 Profundidade Edifício: 7 m	
<b>CENÁRIO PS-4</b> Área Línea ou Escalonada Escalonada Número Pavimentos: 4 a 11 IP: número de residências: térreo + 2 Profundidade Edifício: 12 m		<b>CENÁRIO T-4</b> Área Línea ou Escalonada Escalonada Número Pavimentos: 5 a 10 IP: número de residências: térreo + 1 Profundidade Edifício: 10 m	
<b>CENÁRIO PS-5</b> Área Línea ou Escalonada Altura Única Mínima Número Pavimentos: 5 IP: número de residências: térreo + 1 Profundidade Edifício: 13 m		<b>CENÁRIO T-5</b> Área Línea ou Escalonada Altura Única Mínima Número Pavimentos: 5 IP: número de residências: térreo + 1 Profundidade Edifício: 8 m	
<b>CENÁRIO PS-6</b> Área Línea ou Escalonada Altura Única Mínima Número Pavimentos: 8 IP: número de residências: térreo + 2 Profundidade Edifício: 12 m		<b>CENÁRIO T-6</b> Área Línea ou Escalonada Altura Única Mínima Número Pavimentos: 7 IP: número de residências: térreo + 1 Profundidade Edifício: 10 m	
<b>CENÁRIO PS-7</b> Área Línea ou Escalonada Escalonada Número Pavimentos: 6 a 12 IP: número de residências: térreo + 2 Profundidade Edifício: 15 m		<b>CENÁRIO T-7</b> Área Línea ou Escalonada Escalonada Número Pavimentos: 6 a 11 IP: número de residências: térreo + 1 Profundidade Edifício: 8 m	
<b>CENÁRIO PS-8</b> Área Línea ou Escalonada Altura Única Mínima Número Pavimentos: 7 IP: número de residências: térreo + 2 Profundidade Edifício: 12 m		<b>CENÁRIO T-8</b> Área Línea ou Escalonada Altura Única Mínima Número Pavimentos: 6 IP: número de residências: térreo + 1 Profundidade Edifício: 10 m	
<b>CENÁRIO PS-9</b> Área Línea ou Escalonada Altura Única Mínima Número Pavimentos: 11 IP: número de residências: térreo + 3 Profundidade Edifício: 12 m			

**Fonte.** Elaborado pelas autoras.

As mesmas análises e avaliações da tipologia perimetral podem ser feitas para a tabela de Tipologia Perimetral Semi Aberta, com a ressalva de que esta contém um maior número de cenários com a densidade domiciliar atendendo o valor ideal. Vale destacar, inclusive, o desempenho dos cenários escalonados PS-4 e PS-7, que responderam positivamente a todos os parâmetros sustentáveis.

Em relação aos cenários da tabela Tipologia Torres Isoladas (Edifícios Verticais), estes apresentaram os maiores valores de densidade e nenhum dos cenários ultrapassou o valor ideal de taxa de ocupação. Entretanto, além dos cenários de torres não satisfizerem nenhuma porcentagem de uso misto, também têm a menor porcentagem de área verde dentre as tipologias, não atingindo sequer o mínimo recomendado na maior parte das quadras analisadas. Como reitera Sanches (2020), quanto a este tipo de composição

morfológica baseada em lotes, “a arborização no nível do solo se torna limitada às poucas áreas de fato permeáveis (sem garagens no subsolo) e os espaços livres vegetados se tornam mais fragmentados intraquadra” (SANCHES, 2020, p. 41).

Um fator importante a ser mencionado sobre esta tipologia vertical de torres é o de que as leis brasileiras atuais exigem recuos entre os edifícios e as calçadas e entre os mesmos, o que diminui o aproveitamento do uso do solo, consequentemente limitando a área verde, como observado, e acaba por dificultar atividades no térreo e a interação do pedestre com o espaço. Este efeito é o oposto de fachadas contínuas e próximas aos pedestres, e com oferta de comércio e serviço (fachadas ativas), presentes na tipologia perimetral e perimetral semi aberta, que geram uma percepção de segurança ao pedestre (LING, 2021). Ainda, em ruas cujos edifícios possuem recuos frontais, o trânsito de pedestres chega a ser cinco vezes menor do que o fluxo de pedestres em ruas sem recuos frontais (NETTO, VARGAS, SABOYA, 2012), o que evidencia o impacto negativo que os recuos exercem na caminhabilidade, vitalidade e na ocupação eficiente do espaço urbano.

## 8 Discussão

Ao propor o uso de modelos paramétricos e associativos para a criação de quadras urbanas, integrando conceitos de sustentabilidade ao processo de design, buscou-se compreender cenários e concluir diretrizes e estratégias de projeto para o planejamento de cidades sustentáveis. Diante dos cenários experimentados e do entendimento das relações entre morfologia, densidade e áreas verdes, pode-se concluir que projetando a quadra como unidade, em oposição à lógica do lote isolado como unidade, existem melhores condições para um bom desempenho dos parâmetros de sustentabilidade, coincidindo, com as conclusões obtidas por Sanches (2020), de que os tipos morfológicos em que a quadra é trabalhada como conjunto apresentam melhor desempenho em relação ao conceito de cidades mais verdes e compactas.

## 9 Agradecimentos

As autoras agradecem à FAPESP pela bolsa de Iniciação Científica dada a Juliana Bello Milanez (Processo no. 20/10233-6).

## 10 References

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 37122: Cidades e comunidades sustentáveis: Indicadores para cidades inteligentes. Rio de Janeiro. 2020.
- BREEAM UK New Construction. Non-domestic buildings. 2018. Disponível em <[https://www.breeam.com/NC2018/content/resources/output/10\\_pdf/a4\\_pdf/print/nc\\_uk\\_a4\\_print\\_mono/nc\\_uk\\_a4\\_print\\_mono.pdf](https://www.breeam.com/NC2018/content/resources/output/10_pdf/a4_pdf/print/nc_uk_a4_print_mono/nc_uk_a4_print_mono.pdf)>. Acesso em: 02 de maio de 2021.

CANUTO DA SILVA, Robson; MANUEL do Eirado Amorim, Luiz. Urbanismo paramétrico: parametrizando urbanidade. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Urbano, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

CAVALCANTI, Isabella E. O Form-Based Code na implementação de Espaços de Fruição Pública Integrada: Estudo de aplicação no Hub Internacional para o Desenvolvimento Sustentável (HIDS). Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, UNICAMP, São Paulo, 2021.

COLLECTIVE HOUSING ATLAS. 2020. Disponível em <<https://collectivehousingatlas.net/>>. Acesso em: 02 de maio de 2021.

DERIX, Christian; IZAKI, Ásmund. Empathic Space: The Computation of Human-Centric Architecture. 2014. Disponível em <<http://site.ebrary.com/id/10990949>>. Acesso em: 02 de maio de 2021.

DUANY, Andres; TALEN, Emily. Making the good easy: The smart code alternative. *Fordham Urb. LJ*, v. 29, p. 1445, 2001.

DUARTE, J.P., BEIRÃO, J.N., MONTENEGRO, N., GIL, J. (2012). City Induction: A Model for Formulating, Generating, and Evaluating Urban Designs. In: Arisona, S.M., Aschwanden, G., Halatsch, J., Wonka, P. (Eds.) Digital Urban Modeling and Simulation. Communications in Computer and Information Science, vol 242. Springer, Berlin, Heidelberg.

FARIA, Gustavo Henrique Campos de. Mídias móveis e espaços urbanos. 2020. Disponível em <<https://sites.google.com/unicamp.br/aquadradofuturo#h.9pzn19j3sj0h>>. Acesso em: 02 de maio de 2021.

FARR, Douglas. Sustainable Urbanism: Urban Design with Nature. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2007.

HENSEL, M.U.; NILSSON, F. (Eds.). The Changing Shape of Practice: Integrating Research and Design in Architecture (1st ed.). Routledge. 2016. Disponível em <<https://doi.org/10.4324/9781315715711>>. Acesso em: 02 de maio de 2021.

Institute of Transportation Engineers. Designing Walkable Urban Thoroughfares: A Context Sensitive Approach. 2010. Disponível em <<https://www.ite.org/pub/?id=e1cff43c%2D2354%2Dd714%2D51d9%2D82b39d4dbad>>. Acesso em: 02 de maio de 2021.

JALAEI, Farzad; JRADE, Ahmad. Integrating building information modeling (BIM) and LEED system at the conceptual design stage of sustainable buildings. *Sustainable Cities and Society*, v. 1, pp. 95-107, 2015.

LIMA, F. (2017) MÉTRICAS URBANAS: Sistema (para) métrico para análise e otimização de configurações urbanas de acordo com métricas de avaliação de desempenho.

LIMA, F., BROWN, N. C., DUARTE, J. P. (2022a) A Grammar-Based Optimization Approach for Designing Urban Fabrics and Locating Amenities for 15-Minute Cities. *Buildings – Special issue on Performance-Based Urban Design: Integrated Urban Analytics, Simulation and Climate-Responsive Design*. Online First.

LIMA, F., BROWN, N. C., DUARTE, J. P. (2022b) A grammar-based optimization approach for walkable urban fabrics considering pedestrian accessibility and infrastructure cost. *Environment Planning and B – Special issue on Smart Cities and Climate-Resilient Urban Planning*. Online First.

LIMA, F., BROWN, N., DUARTE, J. P. (2021) Urban Design Optimization: Generative Approaches towards Urban Fabrics with Improved Transit Accessibility and Walkability. In:

Projections: Proceedings of the 26th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia - CAADRIA, Hong Kong, China.

LING, Anthony. Eliminação da exigência de recuos/afastamentos obrigatórios: Guia de Gestão Urbana. Caos planejado, 2021. Disponível em <<https://caosplanejado.com/eliminacao-da-exigencia-de-recuosafastamentos-obrigatorios-guia-de-gestao-urbana/>>. Acesso em: 02 de maio de 2021.

MAKKI, Showkatbakhsh M, Tabony A, Weinstock M. Evolutionary algorithms for generating urban morphology: Variations and multiple objectives. International Journal of Architectural Computing. 2019. doi:10.1177/1478077118777236.

NETTO, Vinicius M.; VARGAS, Julio Celso and SABOYA, Renato T. de. (Buscando) Os efeitos sociais da morfologia arquitetônica. Rev. Bras. Gest. Urbana. 2012, vol.4, n.2, pp.261-282. ISSN 2175-3369. Disponível em <<https://doi.org/10.7213/urbe.7400>>. Acesso em: 02 de maio de 2021.

NORONHA, Marcela. Mobilidade ativa. 2020. Disponível em <<https://sites.google.com/unicamp.br/aquadradofuturo#h.9pzn19j3sj0h>>. Acesso em: 02 de maio de 2021.

OXMAN, Rivka. Theory and design in the first digital age. Design Studies, Vol. 27. 2006. pp 229–265.

SANCHES, Patricia M. Cidades compactas e mais verdes: conciliando densidade urbana e vegetação por meio do desenho urbano. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo USP, Piracicaba, 2020.

SILVA, Geovany Jessé Alexandre da; SILVA, Samira Elias; NOME, Carlos Alejandro. Densidade, dispersão e forma urbana. Dimensões e limites da sustentabilidade habitacional. Arquitextos, São Paulo, ano 16, n. 189.07, Vitrivius, fev. 2016 Disponível em <<https://vitrivius.com.br/revistas/read/arquitextos/16.189/5957>>. Acesso em: 02 de maio de 2021.

SPACESCAPE. City Measures. Disponível em <<https://www.spacescape.se/citymeasures/>>. Acesso em: 02 de maio de 2021.