

A GEOMETRIA DESCRITIVA EM ENSINO DE ARQUITETURA E
URBANISMO E AS FERRAMENTAS CAD:
DIÁLOGOS POSSÍVEIS

Raphael Marcone

Tese de Doutorado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Arquitetura, PROARQ, da Universidade
Federal do Rio de Janeiro, como parte dos
requisitos necessários à obtenção do grau
de Doutor em Arquitetura.

Orientador: Maria Angela Dias

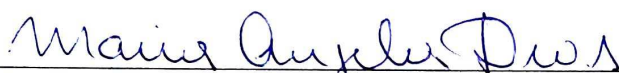
Rio de Janeiro
Março de 2017

A GEOMETRIA DESCRITIVA EM ENSINO DE ARQUITETURA E
URBANISMO E AS FERRAMENTAS CAD:
DIÁLOGOS POSSÍVEIS

Raphael Marcone

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ARQUITETURA.

Aprovada por:


Presidente, Prof. Maria Angela Dias, D.Sc. [PROARQ/UFRJ]


Prof. Andréa Queiroz Rego, D.Sc. [PROARQ /UFRJ]


Prof. Giselle Arteiro N. Azevedo, D.Sc. [PROARQ /UFRJ]


Prof. Rodrigo Gury Paraiço, D.Sc. [PROURB/UFRJ]


Prof. Daniel Wyllie Lacerda Rodrigues, D.Sc. [EBA/UFRJ]


Prof. Darius Chini Gani, D.Sc. [EBA/UFRJ]

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2017

Marcone, Raphael

A Geometria Descritiva em Ensino de
Arquitetura e Urbanismo e as Ferramentas CAD:
diálogos possíveis /Raphael Marcone – Rio de
Janeiro: UFRJ/
PROARQ, 2017.

III, 152 p.:il.; 29,7 cm.

Orientador: Maria Angela Dias

Tese (Doutorado) – UFRJ/ PROARQ/
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 139-144.

1. Geometria Descritiva. 2. Educação Gráfica 3.
Ferramentas CAD. I. Dias, Maria Angela. II.
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Faculdade
de Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-
graduação em Arquitetura. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à professora e orientadora Maria Angela Dias, pelas contribuições e incentivo durante toda a realização da pesquisa que resultou nessa tese.

APRESENTAÇÃO DO AUTOR

O autor leciona, desde 1998, as disciplinas Geometria Descritiva 1 e Geometria Descritiva 2, no Curso de Graduação em Arquitetura e Urbanismo, da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAU) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ); é também arquiteto e urbanista pela FAU-UFRJ e mestre em urbanismo pelo Programa de Pós-graduação em Urbanismo (PROURB) da FAU-UFRJ. Participa, desde 2013, do grupo de pesquisa *A educação do olhar: apreensão dos atributos geométricos da forma dos lugares*, grupo vinculado ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura (PROARQ), da FAU-UFRJ, cujas atividades muito contribuíram para que esta pesquisa se realizasse em um ambiente profícuo à formulação e ao desenvolvimento de ideias. A experiência docente, em geometria descritiva, em um curso de graduação em arquitetura e urbanismo, foi relevante na escolha do viés adotado para a geometria descritiva na pesquisa, compreendendo-a como fundamento às operações com a forma, não só a forma geométrica, mas a arquitetônica e a urbana. Isso levou o autor a pesquisar adequações possíveis nessa fundamentação geométrica, a ser oferecida ao aluno de arquitetura e urbanismo, que respondam às implicações decorrentes da introdução das ferramentas gráficas CAD.

RESUMO

MARCONE, Raphael. **A Geometria Descritiva em Ensino de Arquitetura e Urbanismo e as Ferramentas CAD: diálogos possíveis.** Tese (Doutorado em Arquitetura) - Programa de Pós-graduação em Arquitetura (PROARQ), Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAU), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2017.

O ensino de geometria descritiva, em escolas de arquitetura e urbanismo brasileiras, se justifica como fundamento geométrico aos processos de concepção, representação e construção da forma. Houve, nos últimos anos, com o surgimento de ferramentas digitais CAD (*Computer Aided Design*), uma dinâmica de transformação nestes processos, o que demandou modificações no ensino de arquitetura e urbanismo. Esta pesquisa objetivou contribuir investigando o papel que a geometria, em particular a geometria descritiva, possa ter neste contexto de adequação, ao buscar novos caminhos para o seu ensino. Primeiro se pesquisou as mudanças que as ferramentas de desenho poderiam inferir nas operações sobre a forma, isso por pesquisa bibliográfica. A seguir, aplicou-se um experimento, onde estudantes de arquitetura e urbanismo, com o conhecimento prévio de geometria descritiva e ferramentas analógicas, foram expostos a ferramentas CAD, visando explorar as relações usuais e, em seguida, as não usuais, entre a geometria descritiva e as ferramentas digitais. O experimento durou quatro meses e foi acompanhado por observação, a interpretação dos dados coletados mostrou ser possível se estreitar o diálogo da geometria descritiva com as ferramentas CAD, especialmente quando se amplia sua aplicação, indo além do uso tradicional, que costuma restringi-la à épura e associá-la exclusivamente ao uso de ferramentas gráficas analógicas.

Palavras-chave: geometria descritiva, educação gráfica, ensino de arquitetura, ferramentas CAD, educação do olhar.

ABSTRACT

MARCONE, Raphael. **A Geometria Descritiva em Ensino de Arquitetura e Urbanismo e as Ferramentas CAD: diálogos possíveis.** Tese (Doutorado em Arquitetura) - Programa de Pós-graduação em Arquitetura (PROARQ), Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAU), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2017.

Descriptive geometry is taught in Brazilian Architecture and Urbanism schools as a geometric contribution to the processes of conceiving, representing and constructing form. There have been significant changes in these processes in recent years particularly due to the emergence of CAD (Computer Aided Design) digital tools. That in turn has required that the teaching of geometry adapt in order to meet the demands of this emerging reality. The aim of our research is to investigate the role of descriptive geometry in this new context, and the contribution it can make to the education of students of Architecture and Urbanism. Initially we investigated the changes that the CAD drawing tools could introduce to operations on form. To this end we undertook extensive bibliographical research. We then conducted an experiment in which students of Architecture and Urbanism, who had prior knowledge of descriptive geometry, were exposed to CAD tools, as part of their formal training in graphics on an Architecture and Urbanism undergraduate course. Our aim in the experiment (and the related research) was to explore usual and non-standard relations between descriptive geometry and the use of digital tools. We monitored the experiment over a period of four months and interpreted the collected data. We concluded that it is possible to improve the dialog of descriptive geometry with CAD tools, especially when descriptive geometry applications are extended beyond traditional uses that are usually limited to the dihedral system and associated with analog tools.

Keywords: descriptive geometry, graphic education, architecture education, CAD software, teaching observation.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
1 DINÂMICAS NA ÁREA GRÁFICA	12
1.1 PESQUISAS CONTEMPORÂNEAS	13
1.2 GEOMETRIA DESCRITIVA: DA MATEMÁTICA À ARQUITETURA	22
1.2.1 Processos de Concepção PI2D e PC3D	35
1.3 INFLEXÕES: ESPAÇO, FORMA E FERRAMENTAS	37
1.4 OPERAÇÕES	49
2 MATERIAIS E MÉTODOS	60
2.1 EXPERIÊNCIAS CONTEMPORÂNEAS	62
2.2 AMBIENTES, PROCESSOS E FERRAMENTAS	76
2.2.1 Analógico + PI2D	81
2.2.2 Digital + PI2D	82
2.2.3 Digital + PC3D	83
2.2.4 Digital + PC3D + Programação Visual	84
2.3 MONTAGEM DO EXPERIMENTO	86
3 APLICAÇÃO DO EXPERIMENTO	91
3.1 OBJETO 1	94
3.2 OBJETO 2	110
3.3 ARTICULAÇÃO DO EXPERIMENTO	126
CONSIDERAÇÕES FINAIS	132
REFERÊNCIAS	139
APÊNDICE A: Termo de Consentimento para Pesquisa	145
APÊNDICE B: Plano de Curso de Geom. Descr. Aplicada à Arquitetura	146
ANEXO A: Ementa de Geometria Descritiva Aplicada à Arquitetura	147
ANEXO B: Ementa de Geometria Descritiva 1	148
ANEXO C: Plano de Curso de Geometria Descritiva 1	149
ANEXO D: Ementa de Geometria Descritiva 2	151
ANEXO E: Plano de Curso de Geometria Descritiva 2	152

LISTA DE SIGLAS

2D	bidimensional
3D	tridimensional
AAG	<i>Advances in Architectural Geometry</i>
ABEG	Associação Brasileira de Expressão Gráfica
ACADIA	<i>Association for Computer Aided Design in Architecture</i>
APROGED	Associação dos Professores de Desenho e Geometria Descritiva
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
BLOB	<i>Bynary Large OBject</i>
CAADRIA	<i>Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i> (desenho assistido por computador)
CATIA	<i>Computer-Aided Three dimensional Interactive Application</i>
CNC	<i>Computer Numeric Control</i>
CODA	<i>Computational Design Affairs</i>
ECAADE	<i>Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe</i>
ETSIE	<i>Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación</i>
FAU	Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
GC	<i>Generative Components</i>
GD1	Geometria Descritiva 1
GD2	Geometria Descritiva 2
GDA	Geometria Descritiva Aplicada à Arquitetura
GIS	<i>Geographic Information System</i>
GRAPHICA	Simpósio Nacional de Geometria Descritiva e Desenho Técnico
JGG	Journal for Geometry and Graphics
LAMO3D	Laboratório de Modelos 3D
MIT	<i>Massachussets Institute of Technology</i>
NURBS	<i>Non Uniform Rational Basis Spline</i>
PROARQ	Programa de Pós-graduação em Arquitetura
SG	<i>Smartgeometry</i>
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIGraDi	<i>Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital</i>
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UPC	<i>Universidade Politécnica da Catalunha</i>

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: écura com interseção de pirâmides	23
Figura 2: sistema diédrico e écura	24
Figura 3: planta, corte e vista	26
Figura 4: planta, vista e perspectiva.....	27
Figura 5: projeções cônica e cilíndrico-ortogonal	28
Figura 6: écura de interseção de cone e cilindro.....	30
Figura 7: modelagem digital e simulacro de écura	32
Figura 8: processos de projeto e mundos projetual e real	35
Figura 9: coordenadas globais e locais	38
Figura 10: espaços euclidiano, hiperbólico e elíptico	39
Figura 11: <i>script</i> computacional.....	40
Figura 12: programação visual	41
Figura 13: da folha de papel ao toro.....	43
Figura 14: toro sob transformação topológica	43
Figura 15: reconstituição de mapa de Roma de 1430.....	46
Figura 16: geração paramétrica em edifício residencial	49
Figura 17: curva por centros de curvatura.....	50
Figura 18: curva por pontos e retas de controle	50
Figura 19: curvas de Bézier, B-spline e nurbs.....	51
Figura 20: continuidade de superfície	52
Figura 21: plano tangente e superfícies desenvolvíveis	53
Figura 22: curvatura gaussiana	54
Figura 23: diagnóstico de curvatura gaussiana no <i>Rhinoceros</i>	55
Figura 24: discretização de curva e superfície	55
Figura 25: otimização em malha de cobertura	56
Figura 26: otimização de forma livre	56
Figura 27: fabricação de painel de curvatura simples	57
Figura 28: fabricação de painel de dupla curvatura.....	57
Figura 29: curvas geodésicas no toro	63
Figura 30: toro construído	63
Figura 31: montagem do toro	63
Figura 32: toro com arcos discretizados.....	64

Figura 33: toro em planta, corte e vista	65
Figura 34: toro construído	65
Figura 35: <i>twin houses</i>	66
Figura 36: geração e planificação de anel do toro.....	66
Figura 37: corte dos anéis do toro.....	66
Figura 38: centro do toro - vivências	67
Figura 39: interior do toro	67
Figura 40: toro e árvore central	67
Figura 41: épuras de helicoides desenvolvíveis em giz	68
Figura 42: maquete de helicoide desenvolvível.....	68
Figura 43: interseção das superfícies em modelo digital.....	69
Figura 44: montagem da maquete do pavilhão	69
Figura 45: curva ideal.....	70
Figura 46: discretização da curva por ferramenta CAD.....	70
Figura 47: montagem do pavilhão: peças ao solo	71
Figura 48: montagem do pavilhão: erguer as peças	71
Figura 49: montagem do pavilhão: fixar as peças	71
Figura 50: montagem do pavilhão: trabalho finalizado e equipe	71
Figura 51: pavilhão montado: fachada oeste.....	71
Figura 52: pavilhão montado: fachada oeste + maquete.....	71
Figura 53: pavilhão montado: fachada leste.....	71
Figura 54: propriedade projetiva da seção elíptica no parabolóide	73
Figura 55: propriedade projetiva: demonstração em épura.....	73
Figura 56: anéis na superfície	74
Figura 57: planta e vista do pavilhão	74
Figura 58: pavilhão em finalização: parte interna	74
Figura 59: pavilhão em finalização: parte externa	74
Figura 60: ambiente Analógico + PI2D.....	81
Figura 61: ambiente Digital + PI2D	82
Figura 62: ambiente Digital + PC3D	83
Figura 63: ambiente Digital + PC3D + Programação Visual.....	84
Figura 64: classificação das superfícies geométricas	90
Figura 65: referência arquitetônica.....	95
Figura 66: simplificação e definição geométricas	95

Figura 67: é pura posição 1	96
Figura 68: é pura posição 2.....	96
Figura 69: vistas	96
Figura 70: determinação gráfica de medidas em é pura	97
Figura 71: cálculo das transformações em planificação	97
Figura 72: planificação	97
Figura 73: maquete e sistema diédrico	97
Figura 74: Pl2D + Digital constrói vistas superior e frontal.....	98
Figura 75: impressão em A4 na escala 1/50	98
Figura 76: planificação com ferramenta CAD.....	99
Figura 77: planificação impressa em A4 na escala 1/50	99
Figura 78: modelagem, seção e planificação da superfície no ambiente 3.....	100
Figura 79: vistas obtidas no AutoCAD.....	101
Figura 80: impressão da representação gráfica em A3.....	101
Figura 81: superfície e duas seções.....	102
Figura 82: algoritmo em Grasshopper – superfície e planos secantes.....	102
Figura 83: quatro trechos de superfícies cônicas	104
Figura 84: composição com sete trechos de superfície	104
Figura 85: três folhas A4 virtuais em AutoCAD	105
Figura 86: representação gráfica em A4 de um dos pavilhões.....	106
Figura 87: maquete em 1/100 - corte manual das peças	106
Figura 88: maquete em 1/100 - montagem	106
Figura 89: maquete em 1/50 – corte a laser.....	107
Figura 90: maquete em 1/50 – montagem	107
Figura 91: maquete em 1/50 – finalização	107
Figura 92: pavilhão equipe A.....	108
Figura 93: pavilhão equipe B.....	108
Figura 94: pavilhão equipe C.....	108
Figura 95: pavilhão equipe D.....	108
Figura 96: pavilhão equipe E.....	108
Figura 97: pavilhão equipe F.....	108
Figura 98: eixos, curvas e superfícies das cúpulas	111
Figura 99: discretização da superfície esférica	112
Figura 100: discretização do elipsoide de revolução.....	114

Figura 101: discretização do parabolóide de revolução	114
Figura 102: discretização do toro	114
Figura 103: alunos no LAMO3D	115
Figura 104: interface do software da cortadora a <i>laser</i>	115
Figura 105: cortadora a <i>laser</i>	115
Figura 106: elipsoide – peças de apoio	116
Figura 107: elipsoide – peças planificadas	116
Figura 108: elipsoide – colagem	116
Figura 109: elipsoide – três superfícies	116
Figura 110: elipsoide – união	116
Figura 111: toro em superfície cônica	116
Figura 112: toro em superfície cilíndrica	116
Figura 113: toro em superfície poliédrica	116
Figura 114: toro com união das superfícies	116
Figura 115: maquetes das cúpulas em 1/50	117
Figura 116: identificação de padrões nas maquetes	117
Figura 117: algoritmo das cúpulas: ideal, poliédrica, cilíndrica e cônica	118
Figura 118: curva geratriz e superfície ideal - equipe A	119
Figura 119: curva geratriz e superfície ideal - equipe B	119
Figura 120: curva geratriz e superfície ideal - equipe C	119
Figura 121: digitalização da curva geratriz da cúpula	120
Figura 122: discretização da cúpula em ambiente 4	121
Figura 123: cúpulas em superfícies cilíndricas, poliédricas e cônicas	121
Figura 124: elaboração da representação gráfica em AutoCAD	122
Figura 125: prancha A3 em 1/250	122
Figura 126: parte gráfica e montagem da maquete – equipe D	123
Figura 127: parte gráfica e montagem da maquete – equipe E	123
Figura 128: maquetes em 1/50 das cúpulas de todas as equipes	123
Figura 129: trabalhos finalizados - vistas frontal, superior e maquete	124
Figura 130: projetividade do ângulo reto - épura	128
Figura 131: projetividade do ângulo reto - vistas	128
Figura 132: ângulo reto no modelo digital	128
Figura 133: oito posições de um plano (α) em relação a (π) e (π')	129

Figura 134: interseção de cone e cilindro - modelo digital	129
Figura 135: simulação de projeções vertical e horizontal.....	129
Figura 136: interseção de cone e cilindro - épura	129
Figura 137: gerar superfície cilíndrica por revolução e extrusão	130

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: algumas ferramentas CAD de uso comercial	76
Quadro 2: três eras das ferramentas CAD	77
Quadro 3: ambientes, processos, ferramentas e interfaces	85
Quadro 4: aulas 01 a 08 - objeto 1 nos 4 ambientes.....	94
Quadro 5: aulas 09 a 15 - objeto 2 e variações.....	110

INTRODUÇÃO

O ensino de geometria descritiva, quando se faz presente em cursos de arquitetura e urbanismo no Brasil, costuma ser identificado como contribuição ao conhecimento geométrico utilizado em operações sobre a forma, dentre elas, as de representação da forma. Esse é um papel que nem sempre identificamos que cumpra satisfatoriamente, ao menos com a mesma adequação, em relação às ferramentas digitais mais recentes.

O uso crescente de programas de computador, ou *software*, como ferramentas para a concepção e representação da forma arquitetônica e urbana, nos remete à busca por adequações nas metodologias de ensino dos cursos de arquitetura e urbanismo, adequações que podem ir além da área gráfica.

Chama-nos a atenção, apesar do diálogo estreito da descritiva com as ferramentas analógicas, a sua limitada presença nas pesquisas contemporâneas, mesmo as que tratem do embasamento geométrico utilizado a operar as ferramentas digitais em arquitetura e urbanismo. A estas ferramentas nos referiremos, genericamente, como ferramentas de desenho assistido por computador, ou ferramentas *Computer Aided Design* (CAD), ou simplesmente ferramentas CAD.

O incremento no uso das ferramentas CAD trouxe uma conseqüente demanda por reformulações no ensino de arquitetura e urbanismo, que respondam a esta nova realidade. Há que se ter cuidado para evitar soluções precipitadas, tomadas a partir de observações superficiais desse quadro. Um olhar menos atento poderia nos mostrar o anacronismo da geometria descritiva como base às operações das ferramentas CAD, nos apontar a simples supressão de seu ensino como solução óbvia; ou, em casos extremos, o mero ensino da operação de alguns *software*, negligenciando qualquer saber geométrico que fundamente as operações realizadas por meio de alguma nova ferramenta gráfica.

Pressupomos que o ensino de geometria descritiva, em arquitetura e urbanismo, tenha se mostrado adequado a fundamentar as operações sobre a forma via ferramentas gráficas analógicas; operações de gerar, manipular, representar e construir formas, tanto a geométrica como a arquitetônica e a urbana. Assistimos, de

fins do século XVIII até o último quartel do século XX, na educação gráfica para futuros arquitetos, ao estabelecimento de uma relação de fundamentação que vinha se mostrando equilibrada, entre o ensino da geometria descritiva e as operações sobre forma, com o uso das ferramentas gráficas disponíveis até então, as analógicas.

A introdução das ferramentas CAD demandou conhecimento geométrico e matemático por vezes diverso do utilizado nas ferramentas gráficas analógicas, quanto ao conteúdo ou à maneira de sua aplicação. Requerem-se estudos que esclareçam e reequilibrem a relação do saber geométrico do arquiteto urbanista com as operações subsequentes sobre a forma arquitetônica ou urbana, que conciliem o ensino deste saber geométrico ao uso das ferramentas digitais.

A correspondência, entre saber geométrico e operações sobre a forma, se manteve estável até fins do século passado e teria se estabelecido a partir da prática, em arquitetura e urbanismo, de técnicas de geração e, principalmente, de representação da forma, baseadas nos princípios dos trabalhos de Monge (1798, 1820). Este matemático francês acabou tornando-se conhecido como o pai da geometria descritiva e deixou também relevantes contribuições à geometria diferencial.

A relação entre fundamento geométrico e práticas de representação em arquitetura é exibida por Pérez-Gómez e Pelletier (2000). Esse autor afirma que as práticas de desenho, que se compreendem hoje como embasadas na geometria descritiva, se sustentariam também por contribuições de matemáticos anteriores a Monge, como Desargues, assim como em contribuições de matemáticos posteriores a ele, como Poncelet, com seus estudos em geometria projetiva. A geometria mongiana abriu caminho para a normatização e unificação de práticas que já eram realizadas há séculos, como a confecção de plantas baixas, tal como as conhecemos atualmente. A geometria descritiva consolidou-se como repositório da base de conceitos geométricos necessários à operação das ferramentas de desenho analógicas em arquitetura e urbanismo.

Monge difundiu seus estudos em geometria durante a Revolução Francesa, na *École Normale*, que então se constituía na França, destinada à formação de professores, na *École Polytechnique* e nos círculos militares. Gani (2004) identifica a chegada da geometria descritiva no Brasil justamente via

Academia Real Militar, já em 1812, por uma tradução da obra de Monge (SOUZA, 1812). Gani (2004) nos alerta que a geometria descritiva hoje praticada sofreu alterações ao longo do tempo. Os livros de Rodrigues (1964, 1968) e Pinheiro (1971, 1990, 1994), publicações brasileiras do século XX, são exemplos de obras que já incorporam as modificações da descritiva no decorrer dos anos.

Atualmente, temos algumas práticas no ensino da descritiva que se afastam das características práticas preconizadas por Monge, eventualmente repleta de problemas abstratos, orientados por axiomas que se apoiam nas propriedades projetivas presentes em *épura*, que tem sido a interface gráfica tradicional da geometria descritiva. Esta abordagem tem contribuído para tornar o estudo da descritiva uma experiência árdua e desconectada de aplicações concretas.

Podemos identificar algumas ações de modificação no ensino da descritiva, com fins de facilitar seu aprendizado pelos alunos, ações com abordagens distintas, adotadas mesmo na época em que se utilizavam exclusivamente ferramentas analógicas. Como exemplo de ação, observamos a produção de material didático que promove a materialização da forma que é representada em *épura*, por meio da confecção de maquetes físicas, e, mais recentemente, eletrônicas.

O uso desses modelos tridimensionais, mesmo um modelo virtual como uma maquete eletrônica, costuma se configurar como um acessório a facilitar a compreensão da forma; observamos que estas ações costumam manter a *épura* como interface gráfica principal nas operações sobre a forma, seja gerando-a, manipulando-a, ou representando-a. O *site*, na internet, de geometria descritiva da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAU), da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), é exemplo desta ação e contém maquetes eletrônicas de todo o seu conteúdo didático relativo a exercícios (FATORELLI; SILVA; MARCONE, 2014).

Outra ação, comum no ensino de geometria descritiva, principalmente em escolas de arquitetura e urbanismo, é fazer com que os objetos geométricos utilizados em ensino remetam a objetos arquitetônicos, mesmo que nesses últimos se faça uma redução/simplificação geométrica de sua forma. Com esta simplificação um edifício pode ser compreendido como prisma, ou uma cúpula como semiesfera. Tal como em arquitetura, da forma geometricamente simplificada podem ser feitas representações, em *épura* e em escala, assim a forma arquitetônica ou urbana é

tratada como forma geométrica. Como exemplo temos a publicação de Buery et al. (2011) na edição deste mesmo ano do Simpósio Nacional de Geometria Descritiva e Desenho Técnico (GRAPHICA).

Esse estudo de Buery, assim como esta tese, foram gestados no grupo de pesquisa *a educação do olhar: apreensão dos atributos geométricos da forma dos lugares*, da FAU-UFRJ. Esse grupo de pesquisa, ligado ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura (PROARQ), tem promovido algumas iniciativas que visam tratar do ensino e pesquisa da geometria em arquitetura e urbanismo contextualizados ao momento atual de utilização de múltiplas ferramentas, analógicas e digitais. Uma dessas atividades foi a promoção de *workshop* em duas ocasiões, nos anos de 2014¹ e 2015².

As atividades de *workshop* têm se consolidado como ambiente agregador de atividades de ensino e pesquisa na área gráfica, seja nas Universidades, seja em eventos que precedem Congressos e Seminários, Brasil ou mundo afora, e têm se caracterizado como um ambiente aberto ao novo e à experimentação.

Outro tipo de ação, que podemos citar em ensino, é o desenvolvimento de *software* específicos para o estudo de geometria descritiva, como é o caso da experiência portuguesa na elaboração do programa denominado: *AEIOU - Geometria Descritiva*³. Esse programa permite modelar e reproduzir digitalmente situações vividas em *épura*, e, segundo os próprios autores, tenta seguir o percurso natural de aprendizagem da geometria descritiva. O *software* simula digitalmente a posição espacial dos objetos em relação aos planos de projeção característicos da geometria descritiva, a seguir faz a transposição desta situação espacial para a confecção da *épura*, com a respectiva representação deste objeto nessa interface de *épura*.

Esta tese adota uma abordagem que considera a geometria descritiva inserida na educação gráfica em arquitetura e urbanismo. Começamos por investigar mudanças nas operações de gerar, manipular, representar e mesmo construir a forma arquitetônica, que têm sido estimuladas pela utilização das ferramentas CAD a intermediar essas operações.

¹ Para saber mais sobre este *workshop* ver Marcone e Dias (2015)

² Para saber mais sobre este *workshop* ver Martín-Pastor (2015)

³ Para conhecer o programa acessar

<http://www.estgv.ipv.pt/PaginasPessoais/fmorgado/aeiougd/#Objectivos> (acesso em 28/05/2016)

A primeira mudança significativa teria se manifestado em uma segunda geração de ferramentas CAD, pois as primeiras ferramentas ainda mimetizavam os processos analógicos e se fixavam majoritariamente nas etapas de representação da forma em meio 2D. Essas novas ferramentas passam a modelar digitalmente em 3D e, mais que isso, passam a atuar como protagonistas nas etapas de geração, manipulação e construção dessa forma (AISH, 2013). Essa alteração é relevante à educação gráfica em arquitetura e urbanismo e também ao ensino da geometria descritiva vinculado a esse contexto. A descritiva sempre teve na *épura* a sua reconhecida interface. Em arquitetura e urbanismo temos, por analogia, a interpretação conjugada de planta e corte para compreendermos a forma arquitetônica.

As primeiras ferramentas CAD não alteraram a relação entre ferramenta de desenho e a construção de símbolos de representação. Na produção de plantas baixas, com o *software* AutoCAD, uma parede continuou a ser compreendida como tal ao interpretarmos a sua representação por um par de retas paralelas; na tela do computador continuaram a ser traçadas duas linhas paralelas, tal como se fazia no desenho analógico em uma folha de papel. Ou seja, o fato da ferramenta de desenho ser analógica ou digital não alterou o sistema de representação, os princípios de construção do desenho, nem mesmo demandou embasamento geométrico diverso a operar essa nova ferramenta gráfica.

Quando a modelagem 3D, nos anos 1990, passou a ter mais adeptos em arquitetura e urbanismo, começamos a notar modificações mais significativas na área gráfica. Essas mudanças definiriam um ponto de inflexão nos processos de se operar a forma que nos interessou investigar: a possibilidade de deixarmos de desenhar as projeções de um objeto, seja ele geométrico ou arquitetônico, passando a construir digitalmente este objeto, mesmo que virtualmente, com o auxílio de um software. As projeções desse objeto podem ser produzidas pelo software, como um produto derivado do modelo 3D.

Junto ao surgimento da modelagem 3D, assistimos em arquitetura e urbanismo à proliferação de formas *complexas*, ou *livres*, algumas sujeitas a diversos tipos de transformações geométricas. Essas formas já eram possíveis no tempo da exclusiva utilização de ferramentas analógicas, mas as ferramentas CAD estimularam a sua utilização por facilitar a sua realização em todas as etapas de

projeto, desde a geração, passando por sua manipulação por seções, interseções ou transformações diversas; facilitaram sobremaneira a representação, oferecendo perspectivas, plantas e vistas obtidas de modo quase automático. Identificamos facilidades que as ferramentas digitais trouxeram para a construção dos objetos, por exemplo, ao contribuírem para facilitar a planificação das superfícies que constituem um objeto arquitetônico.

A esta mudança dimensional, de se construir projeções 2D para se construir o modelo virtual 3D, veio se somar outra, que observamos no uso das mais recentes ferramentas CAD, que caracteriza o segundo ponto de inflexão: a aplicação de conceitos geométricos oriundos de outros campos da matemática, não tradicionalmente estudados em geometria descritiva, conceitos relativos à forma e ao espaço (CARPO, 2011; HENRIQUES, 2013; TERZIDIS, 2006). Todo este quadro contribuiu para desequilibrar um dos papéis primordiais que a geometria descritiva desempenhou por duzentos anos em ensino de arquitetura e urbanismo, que foi o de proporcionar os adequados conceitos geométricos a fundamentar as operações sobre a forma arquitetônica.

Esta tese investiga e aproxima duas linhas distintas de operações geométricas sobre a forma arquitetônica: uma identificada com os processos analógicos e que engloba também os primeiros tempos das ferramentas digitais, que se utiliza da geometria descritiva como suporte; a outra é referente às mais recentes ferramentas digitais, que podem produzir operações diversas sobre a forma e incorporar um embasamento geométrico e matemático que, por vezes, vai além do que se utiliza em descritiva.

Embora essa aproximação seja prescindível, (vide as muitas pesquisas que identificamos em nossa revisão de literatura que excluem relação direta entre os processos digitais e a geometria descritiva), ela nos parece ser promissora. Essa aproximação nos ajudará a esclarecer algo que nos chamou a atenção, que é o contraste entre o protagonismo exercido pela geometria descritiva como fundamento às operações sobre a forma desde os tempos de Monge, e a situação de hoje, quando se pode questionar a validade do seu ensino em um curso de arquitetura e urbanismo, dada a sua aparentemente inadequação a apoiar a operação das mais recentes ferramentas CAD. Ao se discutir mudanças relativas à educação gráfica em arquitetura e urbanismo, face ao uso crescente de ferramentas digitais, justificam-se

estudos como este, que possam nos ajudar a esclarecer questões que nos apóiem a tomar decisões sobre quais caminhos tomar, que conteúdos ensinar e como ensiná-los.

Este papel da geometria descritiva, de apoio direto às operações sobre a forma, via ferramentas gráficas, foi o adotado nessa pesquisa. Há pesquisadores que apontam outras contribuições da descritiva, como a de desenvolver o raciocínio espacial ou o raciocínio gráfico. Vamos adotá-lo cientes de que não é o único papel possível, mas talvez um dos que mais tenha sofrido o impacto da introdução das ferramentas CAD.

Constatamos um **problema**: não há um diálogo afinado entre o ensino da geometria descritiva, no âmbito da educação gráfica em um curso de arquitetura e urbanismo, com as múltiplas ferramentas gráficas, (principalmente as mais recentes ferramentas digitais), nos procedimentos de gerar, manipular, representar ou de construir a forma arquitetônica. Identificamos em literatura dois fatores indutores a este problema, presentes em ambientes de projeto capitaneados pelas mais recentes ferramentas digitais:

- O deslocamento da interface 2D para a 3D, desarticulando as analogias tradicionalmente feitas entre a *épura* e as representações bidimensionais da forma em arquitetura e urbanismo.
- A crescente utilização, na operação das ferramentas CAD, desde as etapas de concepção até as de construção do objeto arquitetônico, de fundamentos matemáticos e geométricos alheios aos tradicionalmente ministrados em cursos de geometria descritiva.

Cabe lembrar que o ensino de geometria descritiva tem se servido primordialmente da interface gráfica da *épura*, mesmo que não seja a única possível; é comum que se estabeleçam analogias da *épura* com as práticas de representação plana da forma arquitetônica e urbana, assim é costume que se associe primordialmente, em ensino de arquitetura e urbanismo, a descritiva às ferramentas gráficas de interface bidimensionais.

Temos como **hipótese** a de que o ensino de geometria, em arquitetura e urbanismo, dadas as alterações relevantes pelas quais vêm passando as ferramentas gráficas nos últimos anos, demande uma adequação que considere a multiplicidade das ferramentas, de suas interfaces e dos conceitos geométricos necessários para operá-las. Assim, as práticas de ensino de geometria em arquitetura e urbanismo melhor manteriam a correspondência entre saber geométrico e operações subsequentes sobre a forma arquitetônica e urbana.

Ao se recortar o **objeto** desta tese escolhemos o ensino da geometria descritiva em escolas de arquitetura e urbanismo, com específico viés de embasar as operações sobre a forma arquitetônica. O saber geométrico é recortado como fundamento das operações sobre a forma, realizadas por meio das ferramentas de desenho, sejam estas últimas analógicas ou digitais; desconsideram-se outras abordagens a respeito do papel deste saber geométrico como, por exemplo, o de desenvolver o raciocínio espacial do arquiteto urbanista ou o de facilitar a compreensão da forma.

Esta investigação tem por **objetivo geral**:

- contribuir para adequar o ensino de geometria, em particular o da geometria descritiva, em escolas de arquitetura e urbanismo, às operações sobre a forma realizada por múltiplas ferramentas gráficas, sejam analógicas ou digitais, de interface 2D ou 3D.

E tem os **objetivos específicos** de:

- destacar mudanças que as ferramentas digitais possam estimular nas operações de geração, representação e construção da forma arquitetônica;
- identificar alterações na utilização de fundamentos matemáticos e geométricos que apoiem a execução destas operações;
- reconhecer aplicações possíveis da geometria descritiva em diferentes ferramentas digitais, mesmo que não utilizem interfaces análogas à épura;
- testar e apontar caminhos para o ensino da geometria em arquitetura e urbanismo, que levem em conta a dinâmica destas

transformações nas operações sobre a forma e nas ferramentas gráficas.

Quanto à metodologia, em sua parte inicial a pesquisa concentrou-se na interpretação das fontes bibliográficas consultadas, onde foi possível definir os principais conceitos utilizados em pesquisa, relativos a ferramentas gráficas que operam nos ambientes 2D e 3D, sejam estas ferramentas analógicas ou digitais, bem como identificar atributos formais, espaciais, de fundamentação matemática e geométrica, assim como operações sobre a forma que se mostraram emergentes junto às ferramentas CAD.

Com base nos fundamentos teóricos partiu-se para a etapa seguinte, que consistiu na realização de um experimento, com um grupo de estudantes de arquitetura e urbanismo, realizado de abril a julho de 2016. Esse grupo, de 25 estudantes, compôs a amostra do experimento, todos eles alunos do Curso de Arquitetura e Urbanismo da FAU-UFRJ, com conhecimento de geometria descritiva, de ferramentas gráficas analógicas e pouco ou nenhum conhecimento de ferramentas CAD.

O grupo realizou uma série de operações sobre a forma, em ambiente controlado e sob observação do pesquisador. As operações compreendiam gerar, manipular, representar e construir a forma, por meio de ferramentas analógicas, como lhes era usual, e também com o uso de ferramentas CAD, o que não lhes era usual. Além das ferramentas CAD, eram não usuais ao grupo algumas operações que realizaram sobre a forma, identificadas nesta pesquisa como recorrentes em ambiente digital, que estão detalhadas no capítulo um dessa tese.

O experimento de pesquisa teve abordagem qualitativa e os seus dados foram coletados por observação intensiva (MARCONI; LAKATOS, 2005). Em termos gerais, o experimento proporcionou observar a ação da geometria descritiva como fundamento às operações sobre a forma, com o uso de múltiplas ferramentas, sejam as analógicas, nas quais esta relação de fundamentação parece estar mais bem compreendida, sejam nas digitais, que carece de investigação. A coleta e interpretação dos dados nos ajudou a alcançar os objetivos da pesquisa, já explicitados anteriormente.

Destinamos o segundo capítulo desta tese à formatação do experimento, no qual a metodologia empregada nesta etapa da pesquisa será pormenorizada.

A pesquisa está organizada, entre a introdução e suas considerações finais, em três capítulos, que passamos a apresentar.

No **capítulo um** investigamos as mudanças na área gráfica advindas da introdução de ferramentas de desenho. É o capítulo que reúne as principais referências teóricas dessa pesquisa. Inicia-se com um percurso por algumas pesquisas contemporâneas que tratam da adequação da educação gráfica aos tempos de mudança nas ferramentas de desenho. Passamos, em seguida, a investigar a trajetória da geometria descritiva, do campo da matemática até se situar como saber constituinte da educação gráfica em arquitetura e urbanismo. A seguir, construímos alguns conceitos utilizados em nossa pesquisa e investigamos dois movimentos indutores do nosso problema. O primeiro movimento é o deslocamento, do ambiente 2D para o 3D, dos processos de se operar a forma, seguido das implicações dessa alteração em geometria descritiva e na educação gráfica em arquitetura e urbanismo. O segundo movimento é a emergência, junto ao uso das ferramentas digitais mais recentes, de atributos formais, espaciais e de fundamentação matemática e geométrica, até então pouco aplicados em arquitetura e urbanismo. Por fim, destacamos, nas operações sobre a forma, alguns procedimentos recorrentes que se observam na atualidade, capitaneados pelas ferramentas CAD.

O **capítulo dois** é destinado à descrição da elaboração do experimento, onde estão os materiais e métodos da pesquisa. Três procedimentos, envolvidos nessa elaboração, acabaram por compor as três seções do capítulo. Na primeira seção identificamos, em experiências contemporâneas de ensino, que utilizam a geometria contextualizada à educação gráfica em arquitetura e urbanismo, características e princípios a serem reproduzidos em nosso experimento. Tiveram destaque experiências que envolvam as etapas de conceber, representar e construir a forma e que usem ferramentas e técnicas mistas: analógicas e digitais. Na segunda seção elegemos algumas ferramentas gráficas, analógicas e digitais, adequadas ao experimento. Como critério a esta eleição temos os de serem utilizadas em arquitetura e urbanismo, atuarem em ambiente 2D e 3D e com elas ser possível executar as principais operações sobre a forma. Na terceira e última seção

é feita a finalização da elaboração do experimento, com a adequação às possibilidades e/ou limitações da pesquisa relativas a acesso a meios materiais (indivíduos que comporão a amostra, software, equipamentos e demais insumos) e outras condicionantes, para que o experimento fosse exequível. Por fim, o experimento foi formatado em linhas gerais, reforçando os objetivos a serem alcançados através de sua realização.

No **capítulo três** temos a descrição da aplicação do experimento, que foi dividido em dois módulos. O primeiro foi todo realizado tendo um único objeto arquitetônico e a diretriz principal foi a de fazer com que os indivíduos da amostra utilizassem múltiplas ferramentas de desenho, alternando entre analógicas e digitais, 2D e 3D, eventualmente realizando até idênticas operações formais em cada uma destas ferramentas; assim poderiam ser observadas nuances nas operações sobre a forma, ligadas a características intrínsecas às ferramentas gráficas. Esta parte do experimento reproduziu a sequência cronológica de adesão a ferramentas de desenho em arquitetura e urbanismo, um percurso do analógico 2D para o Digital 3D. No segundo módulo do experimento, elegemos outro objeto arquitetônico. A partir dele nos concentramos em explorar características que as ferramentas digitais pudessem proporcionar ao já partirmos das operações sobre a forma em modelagem 3D, utilizando atributos das mais recentes ferramentas CAD e operações recorrentes no uso das mesmas, como a parametrização. Durante a aplicação desse módulo, buscamos conexões com a maneira de se operar a forma característica da geometria descritiva e com as representações 2D do objeto. Foi um percurso inverso ao realizado na primeira parte do experimento, agora do 3D para o 2D. Ao fim do capítulo é feita a articulação do que se observou no experimento, com o ensino de geometria descritiva, a hipótese e as premissas da pesquisa.

1 DINÂMICAS NA ÁREA GRÁFICA

A introdução de novas ferramentas de desenho tem provocado mudanças na área gráfica, não só na maneira de conceber, representar e construir a forma, mas também na busca de novos caminhos para a educação gráfica. Este capítulo é dividido em quatro seções, que mostram a dinâmica dessas mudanças.

Na primeira, delineamos um percurso por pesquisas que exploram mudanças na área gráfica, estimuladas pelo uso das ferramentas digitais, que tratam de geometria descritiva e de educação gráfica. Essas pesquisas nos mostram a pluralidade de abordagens possível nas propostas de reformulação na educação gráfica.

Na seção seguinte, discorreremos sobre a trajetória da geometria descritiva, desde a sua origem na matemática, até a sua aplicação em arquitetura e urbanismo, aplicação que permitiu embasar operações com a forma arquitetônica e urbana.

Apontamos, na terceira seção, algumas mudanças que as ferramentas digitais induziram em aspectos relativos à forma e ao espaço, que chamamos de *inflexões*. Dentre esses aspectos, está o de possibilitar que a forma seja definida por algoritmos, em vez de um desenho. Estes aspectos serão retomados no terceiro capítulo, onde está descrita a aplicação do experimento.

Na quarta e última seção, destacamos operações sobre a forma que se mostram, além de recorrentes, promovidas pelo uso das ferramentas CAD, nas práticas contemporâneas de projeto em arquitetura e urbanismo. Essas operações, em sua maioria, serão também retomadas e utilizadas no experimento, que é descrito no capítulo três.

1.1 PESQUISAS CONTEMPORÂNEAS

Fizemos um percurso por algumas pesquisas contemporâneas nas áreas relacionadas a esta pesquisa como: geometria descritiva, educação gráfica em arquitetura e urbanismo e ferramentas digitais. Isso nos ajudou a compreender como os pesquisadores têm se movimentado e se posicionado acerca desses temas. Procuramos igualmente publicações que tratam da adequação do ensino da geometria descritiva, frente à dinâmica da introdução das ferramentas digitais na educação gráfica em arquitetura e urbanismo, estudos que se relacionem com o nosso objeto de pesquisa. Nesse sentido, foi produtivo observarmos os trabalhos publicados nos respectivos anais de simpósios ou congressos que tratem desses assuntos, recorreremos também a outros tipos de publicação, como coletâneas, que tivessem a característica de agrupar trabalhos dessas áreas ou temas.

Dito isso, observamos o GRAPHICA, simpósio que ocorre de dois em dois anos, voltado a questões da educação gráfica e do ensino da geometria, não especificamente em arquitetura e urbanismo. Apesar de ser um seminário nacional, promovido pela Associação Brasileira de Expressão Gráfica (ABEG), a edição de 2015 foi promovida em Lisboa, conjuntamente com a entidade portuguesa: Associação dos professores de Desenho e Geometria Descritiva (APROGED). Poderíamos assim observar uma amostra da produção brasileira, e, nesta específica edição, luso-brasileira, relativa ao ensino de geometria descritiva.

Nas publicações desse simpósio, alguns trabalhos se servem das ferramentas digitais para auxílio no ensino da geometria descritiva, eventualmente por meio de algum *software* utilizado também em arquitetura e urbanismo, como o *sketchUp*, podendo utilizar técnica mistas digitais e analógicas, seja na elaboração de alguma parte gráfica ou de algum modelo geométrico reduzido. Podemos identificar o caráter predominante da utilização de *software* quando esses se combinam ao ensino de geometria descritiva, como apoio didático à visualização espacial, direcionado a criar um ambiente de aprendizagem, onde as ferramentas digitais estejam presentes. Além de ensinar geometria descritiva, o estímulo ao desenvolvimento de proficiências tradicionalmente atribuídas à sua prática, como a do bom raciocínio espacial, costuma estar presentes na justificativa desses trabalhos. Teixeira e Santos (2015) nos exhibe uma experiência com o software

hypercalc, não utilizado em arquitetura, que permite a construção de ambientes de aprendizagem, com ele foi criado um desses ambientes em geometria descritiva.

Uma aplicação desse mesmo software podemos ver na tese de Seabra (2009), que criou um ambiente de aprendizagem ao utilizar a realidade virtual, com a finalidade de desenvolver a habilidade de visualização espacial. Definido o ambiente, o pesquisador fez um experimento com os alunos de graduação em Engenharia da Universidade de São Paulo (USP), colheu resultados que comprovaram a utilidade das ferramentas digitais, tanto como facilitadoras do ensino de geometria descritiva, como no desenvolvimento do raciocínio espacial dos alunos.

Ao buscarmos um panorama internacional, ainda nas pesquisas em geometria, observamos os artigos do *Journal for Geometry and Graphics* (JGG), publicação anual (desde 1997) da *International Society for Geometry and Graphics*. Há trabalhos em educação gráfica, geometria e alguns específicos em geometria descritiva. Publicado em inglês, reúne trabalhos de pesquisadores de países onde há tradição de ensino da geometria descritiva, como Áustria, Rússia e Japão.

Muitas das publicações do JGG são de pesquisas que se inserem exclusivamente no campo da matemática, isso nos lembra da autonomia que esta ciência pode ter em relação às demais, e que a geometria descritiva também possa ter quanto a possíveis aplicações práticas em arquitetura e urbanismo. O artigo de Volvok (2015) apresenta uma aplicação da parametrização ao ensino de geometria descritiva, um estudo inscrito exclusivamente no campo da geometria, sem qualquer aplicação direta com a representação gráfica em arquitetura e urbanismo, sem associar parametrização à sua recorrente aplicação prática na geração de formas arquitetônicas por ferramentas digitais, característica que notamos ser recorrente hoje em dia.

Vale lembrar que o problema, que destacamos nessa investigação, não existiria se víssemos a geometria descritiva restrita ao campo da matemática, o problema só existe ao compreendermos a geometria descritiva no ensino da arquitetura e urbanismo, e mesmo assim com o viés, ou com o papel de apoiar diretamente as operações com a forma arquitetônica e urbana.

Dentre as publicações do JGG, relacionadas à educação gráfica, temos o trabalho de Suzuki (2014). Professor da Universidade de Tokyo, na Escola de Artes e Ciências, o autor descreve a abordagem, adotada por essa instituição, para o ensino de geometria descritiva e ferramentas CAD de modelagem tridimensional (3D), estas últimas inseridas no currículo no ano de 2007. A Instituição ministra previamente aulas de geometria descritiva, posteriormente os alunos aprendem a modelagem 3D. No ensino da descritiva, enfatiza os desenhos analógicos e as representações bidimensionais, representações que foram identificadas como algo que vem perdendo espaço quanto ao uso, mas que deveriam ser mantidas em ensino, pois incluiriam em sua realização conceito teóricos por trás destas mesmas técnicas tradicionais, conceitos que poderiam ser aplicados posteriormente no uso da modelagem digital. Frente ao problema de se adequar o ensino da geometria a novas ferramentas gráficas, se escolheu utilizar tanto as ferramentas analógicas como as digitais, manter o estudo da representação bidimensional (2D) e incluir o estudo da 3D, adotou-se assim o caminho de fortalecimento da aprendizagem dos conceitos geométricos, implícitos por trás de cada técnica.

Abordagem semelhante tem sido defendida pelo austríaco Stachel (2007), que inclusive é um dos editores do JGG. O pesquisador argumenta que algumas proficiências adquiridas no estudo da geometria descritiva, mesmo em um ensino dito tradicional, como a de se compreender um objeto tridimensional por suas projeções em um plano, ampliam a capacidade de compreensão de sua forma, que seria reduzida ao se trabalhar unicamente e diretamente com modelos tridimensionais digitais. Stachel nos lembra que as projeções bidimensionais que a descritiva produz são análogas a pontos de vista desses objetos tridimensionais, defende que este tipo de representação da forma tende a permanecer entre nós por muito tempo ainda. O pesquisador destaca que o escopo dos cursos de geometria descritiva acaba por não se restringir às representações em épura, ao incluir tópicos de campos diversos da matemática. A descritiva promove a aproximação intuitiva a básicos conceitos da geometria diferencial, aplicáveis a curvas e superfícies (por exemplo: curvaturas e plano osculador) e alguma semelhante aproximação da geometria analítica. O estudo de geometria espacial presente no escopo de cursos de descritiva pode abrir portas ao ensino da modelagem digital. Stachel alega que o estudo da descritiva, além de aumentar o repertório formal dos estudantes, se

configura como um ótimo ambiente aos alunos desenvolverem a habilidade de resolver problemas aplicáveis sobre uma forma, sem necessariamente recorrer às soluções analíticas, que tendem a ganhar cada vez mais espaço.

Observando as ponderações de Suzuki (2014) e Stachel (2007), identificamos nesses pesquisadores uma postura de reformulação no ensino da educação gráfica, que mantém o ensino da geometria descritiva na entrada do processo de aprendizagem do aluno. Em seguida, passaria a ser ensinada a modelagem tridimensional, o que acaba por reproduzir, na estrutura curricular, a sequência cronológica histórica ocorrida em arquitetura e urbanismo na utilização das ferramentas de desenho. Esta cronologia, em muitos currículos de cursos de arquitetura e urbanismo, acaba por se repetir na sequência de apresentação das ferramentas gráficas aos alunos. É uma opção de ensino que nos garantiria, tanto a fundamentação geométrica necessária para se operar as ferramentas analógicas, já conhecida e assente sobre a geometria descritiva, como seriam contempladas as ferramentas digitais em momento imediatamente posterior.

Entendemos ser esta uma decisão prudente, como um rumo que a educação gráfica possa tomar, num momento em que há mudanças rápidas e a convivência de múltiplas ferramentas de desenho, tanto analógicas como digitais. Seria prudente, por manter algo que se acredita funcionar para as representações 2D, buscando uma adaptação, sem adotar uma solução que desconstrua as experiências consolidadas.

Perguntamo-nos se esta ordem de apresentação, seja das ferramentas, seja do aparato geométrico considerado adequado a operá-las, seria necessariamente a única que deva ser seguida em um curso de arquitetura e urbanismo. As gerações mais novas talvez tenham uma experiência de vida em que sejam primeiramente apresentadas a um ambiente 3D, modelado digitalmente, ainda na infância, como usuárias de jogos eletrônicos, subvertendo de antemão esta ordem. Observamos que, atualmente, há uma oferta de aplicativos para celular e *tablet* (como o *formit 360*), como também de programas para *desktop* (*sketchUp*), muitos deles gratuitos, que oferecem uma experiência de modelagem digital, mesmo que sumária: fácil e intuitiva, passível de ser vivida pelos alunos antes que um professor em um curso de arquitetura e urbanismo, os leve a experimentá-la.

Esta inversão de ordem pode mesmo ser oferecida pelas recentes ferramentas CAD, ao proporcionar que modelemos a forma, e, a partir do modelo digital tridimensional, produzamos automaticamente projeções bidimensionais do objeto, que em arquitetura e urbanismo poderiam corresponder às plantas, cortes e vistas. Mitchell (2008, p.52) nos fala da ferramenta de desenho como definidora de um conjunto de símbolos, que o arquiteto-urbanista manipula em momento de projeto, um sistema sensível às mudanças nas ferramentas de representação. Podemos utilizar o seu trabalho, publicado originalmente em inglês em 1990, para o entendimento da relação entre os ambientes de projeto (seja analógico ou digital, 2D ou 3D) e os sistemas de representação da forma.

O livro *Architectural Geometry* (POTTSMANN, Helmut et al., 2008), escrito por três geômetras e pelo arquiteto Axel Kilian, traz, nas suas pouco mais de setecentas páginas, uma reunião das mais frequentes operações geométricas sobre a forma arquitetônica, já deslocadas da interface 2D da *épura* para a interface 3D das mais recentes ferramentas digitais. No início do livro, pouco mais de quarenta páginas são dedicadas à explicação das questões projetivas, muitas relacionadas à geometria descritiva; inclui também o estudo das sombras e da perspectiva cônica, identificadas pelos autores como questões básicas a se entender procedimentos que seriam realizados em modelagem digital 3D. Passadas estas primeiras páginas, as questões geométricas já não se referem a qualquer *épura*, sem prejuízo a que continuem a exibir muitas das operações usualmente já executadas pela geometria descritiva com a interface da *épura* como: geração de superfícies, seções e interseções. Além dessas já conhecidas operações, o livro inclui outras que são notadamente proporcionadas ou facilitadas pela ferramenta digital. Em seu prefácio é dito que o livro é direcionado a estudantes de graduação em arquitetura, podendo atender aos de engenharia ou *design*. Os autores argumentam que este livro vem ajudar a preencher uma lacuna nos livros de geometria voltados à arquitetura, que costumam tratar principalmente de, e se restringir, à geometria descritiva clássica, com a tradicional interface da *épura*. Os autores defendem que os arquitetos não devam ser meros operadores de ferramentas CAD, mas conhecedores de uma base sólida de geometria. Chama-nos a atenção, ainda no prefácio, que apontem acreditar que está surgindo um novo campo de pesquisa, com o mesmo nome do livro: *Architectural Geometry*, ou *Geometria Arquitetônica*.

Com frequência bienal, realizado desde 2008 e já na sua quinta edição no ano de 2016, temos o Simpósio *Advances in Architectural Geometry* (AAG). Na apresentação da publicação, contida nos anais do evento de 2016 (ADRIAENSSENS, et al., 2016), aparece novamente o termo *Geometria Arquitetônica*, ou *Architectural Geometry*, como tema agregador dos trabalhos apresentados no Simpósio, acompanhado de sucinta explicação. A apresentação segue dizendo que a geometria estaria no cerne da concepção arquitetônica, sendo onipresente em todas as fases do projeto, desde os estudos iniciais até a construção do edifício. Prossegue afirmando que a moderna computação com base geométrica oferece diversas possibilidades para projetar, analisar e fabricar formas complexas; se por um lado isso abre novos horizontes para a arquitetura, por outro também coloca novos problemas à geometria. Em torno desses novos problemas é que teria surgido a área de pesquisa em Geometria Arquitetônica, localizada na fronteira entre geometria aplicada e arquitetura. Como exemplo temos o artigo de Vaudeville et al. (2012), que exhibe, do projeto à fabricação, a cobertura da Fundação Louis Vuitton em Paris, projeto do arquiteto Frank Gehry.

Os trabalhos, que se apresentam nos Simpósios AAG, realmente exploram as questões geométricas em todas as etapas da produção da forma arquitetônica, não concentra as maiores questões geométricas na representação da forma, ou, no que poderíamos entender em um currículo em um curso de arquitetura e urbanismo, voltadas à educação gráfica. No que se refere às representações da forma, notamos praticamente ausentes, nos anais, trabalhos em que elas se manifestem como as tradicionais plantas, cortes ou vistas; nesses trabalhos, perspectivas obtidas digitalmente assumem o papel de nos explicar e nos fazer entender sobre a forma ali representada. A geometria aplicada à construção não é novidade, podemos exemplificar uma aplicação específica da geometria descritiva com o trabalho em estereotomia desenvolvido por Monge, na virada dos séculos XVIII para XIX, compreendendo estudos gráficos para cortes de pedra que proporcionassem encaixes das mesmas, quando utilizadas em construções.

Nos simpósios AAG reúnem-se arquitetos, engenheiros, matemáticos, programadores e construtores, juntando diversos profissionais da construção civil com pesquisadores em arquitetura e engenharia, participantes do meio acadêmico à indústria.

Pelo livro *Inside Smartgeometry* (PETERS; PETERS, 2013) tomamos conhecimento do grupo *Smartgeometry* (SG), formado por arquitetos e designers em 2001, desde 2003 vêm promovendo conferências anuais precedidas de *workshop*, desenvolvendo trabalhos com caráter parecido com os do AAG, trabalhos que atuam do projeto à construção. Notamos no grupo SG uma ênfase na exploração de novas fronteiras no *design*, permitida pelas ferramentas digitais, com foco em aplicar em arquitetura o design computacional e o paramétrico. O grupo se preocupa também com próprio desenvolvimento das ferramentas digitais, valorizando-as como instrumentos de projeto; na década passada, inclusive, alguns de seus membros colaboraram com o desenvolvimento do software *Generative Components* (GC). Na origem da formação deste grupo, que posteriormente se expandiu, temos Hugh Whitehead, Lars Hesselgren e J Parrish, profissionais de arquitetura dos respectivos escritórios londrinos Foster + Partners, Kohn Pedersen Fox (KPF) e ArupSport.

Pinçado do mesmo livro temos o artigo de Burry (2013), intitulado *From Descriptive Geometry to Smartgeometry*, que não seria um típico trabalho apresentado nas mais recentes conferências do SG, por não mostrar as mais novas aplicações das ferramentas CAD, o destacamos aqui por apresentar a sua trajetória de vida como arquiteto, no uso das ferramentas de representação. É uma trajetória apresentada desde 1979, quando recorria à geometria descritiva e às ferramentas analógicas, até a segunda década do século XX, quando já utiliza as mais novas ferramentas digitais. Burry, ao ilustrar sua experiência com geometria descritiva e ferramentas CAD, exibe um estudo feito na Basílica da Sagrada Família, projetada por Antoni Gaudí, em Barcelona. Particularmente nos interessa em seu artigo a descrição de suas tentativas, ao longo de sua vida profissional de arquiteto, de aplicar o seu conhecimento geométrico, inicialmente capitaneado pela geometria descritiva, em diversas ferramentas de desenho. Burry cita os acertos e desacertos que surgiram nestas tentativas, com as sucessivas alterações das ferramentas de desenho ao longo dos anos. Notável exemplo é a sua transposição dos conhecimentos de descritiva, que usualmente aplicava em meio analógico, aos *software* gráficos. Alguns desacertos, narrados por Burry nessa transposição, reforçam o nosso argumento, que é o de haver uma relação de adequação entre conhecimento geométrico e a ferramenta gráfica, seja esta última qual for, relação esta que pode ou não estar afinada.

Ao se buscar um panorama da produção de pesquisas no Brasil, relacionadas a *software* gráficos, observamos alguns dos trabalhos publicados nos anais do Congresso anual da *Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital* (SiGraDi). Esta organização abriga arquitetos urbanistas e designers, dentre outros profissionais; cumpre um papel regional semelhante aos que a *Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe* (ECAADE), *Association for Computer Aided Design in Architecture* (ACADIA) e *Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia* (CAADRIA) cumpriram respectivamente na Europa, América do Norte e Ásia/Oceania. Os congressos da SiGraDi se definem por debater as últimas aplicações de tecnologias gráficas, com presença mais marcante de pesquisadores vinculados a instituições de ensino. Observamos trabalhos variados utilizando BIM, modelagem digital, prototipagem rápida, *design*, sistemas generativos e ensino.

Nesses eventos, promovidos pela SiGraDi, AAG ou SG, é recorrente a realização de *workshop*, seja conjuntamente ou previamente à realização dos mesmos, *workshop* onde é usual que se construa algum objeto, seja um modelo reduzido, ou uma estrutura provisória já em 1:1. Também é frequente nos eventos a apresentação de trabalhos que relatem este mesmo ato de construir, de se materializar algo.

Os *workshop* estariam presentes não só nesses eventos, ou exclusivamente concebidos como ambiente de pesquisa, são realizados também como ambiente de ensino em arquitetura e urbanismo. Podemos citar como referência o trabalho desenvolvido por pesquisadores da Universidade de Sevilha, como Martín-Pastor e Narváez-Rodríguez, que têm desenvolvido pesquisas que utilizam o *workshop* também como um ambiente de ensino, e, no que mais nos interessa: de ambiente de ensino de geometria contextualizada à arquitetura e às mais recentes ferramentas CAD. No SiGraDi de 2014, temos uma publicação que nos conta destas pesquisas (MARTÍN-PASTOR, Andrés et al., 2014). Trabalhos destes mesmos pesquisadores podem ser consultados nos anais dos Simpósios AAG, onde nas edições de 2014 e 2016 temos respectivamente Narváez-Rodríguez, Martín-Pastor e Aguilar-Alejandro (2014) e Narváez-Rodríguez e Barrera-Vera (2016). Em suas pesquisas, há o enfrentamento do problema de se adequar o ensino da geometria às novas ferramentas CAD; trazem referências diretas à

utilização de conceitos usuais no ensino tradicional da geometria descritiva, alguns inclusive relativos a propriedades projetivas; desenvolve, a partir deles, com as ferramentas digitais, operações com a forma nestes ambientes de *workshop*, concebidos como ambientes de ensino.

Martín-Pastor (2015) nos traz uma discussão sobre o papel da geometria descritiva, que considera o contexto atual de uso das ferramentas CAD em arquitetura e urbanismo, situa a descritiva no campo que hoje parece se constituir e começar a ser chamado por *Geometria Arquitetônica*. Neste campo, Pastor identifica a geometria descritiva como fundamento geométrico natural a tudo que não seja algébrico ou algorítmico, mas que possa se relacionar ao pensamento gráfico. Pastor defende a não utilização exclusiva do sistema diédrico, ou sua formatação clássica como a *épura* usual em geometria descritiva, que lhe parece limitada e obsoleta frente às recentes ferramentas CAD; preconiza que devemos pensar em aplicações do pensamento gráfico nas recentes ferramentas CAD, que respondam às novas questões impostas pelo uso dessas mesmas ferramentas, identifica esta demanda como sinal de uma provável mudança de paradigmas. Esta argumentação é uma resposta do pesquisador a um problema que identificou em seu país de origem, a Espanha, lá o ensino de geometria descritiva foi suprimido de muitos cursos de arquitetura e urbanismo quando, em seguida, observou-se um vácuo no fundamento geométrico ao se operar a forma com as ferramentas digitais.

Nessa primeira seção observamos as várias possibilidades de ações de reformulação da educação gráfica em arquitetura e urbanismo. Na próxima seção do capítulo, considerando a contribuição da geometria descritiva na área gráfica, investigaremos como este saber geométrico, advindo da matemática, passou a fazer parte da prática arquitetônica e urbana.

1.2 GEOMETRIA DESCRITIVA: DA MATEMÁTICA À ARQUITETURA

Gaspar Monge não era arquiteto, no entanto o saber geométrico de suas Lições⁴ veio a configurar, desde o final do século XVIII, um sistema gráfico que fundamenta representações em arquitetura e urbanismo. Além das representações, a geometria descritiva deu meios precisos de apoiar, em interface gráfica bidimensional, operações tanto para conceber como construir a forma. Investigaremos como se estabeleceu esta fundamentação nas ferramentas gráficas de interface 2D e 3D.

Temos a transcrição dos dois primeiros parágrafos das Lições de Monge na *École Normale*, no original e seguida de sua tradução ao português já em 1812, utilizada para educar os alunos da Real Academia Militar do Rio de Janeiro:

La géométrie descriptive a deux objets: le premier, de donner les méthodes pour représenter sur une feuille de dessin qui n'a que deux dimensions, savoir, longueur et largeur, tous les corps de la nature, qui en ont trois, longueur, largeur et profondeur, pourvu néanmoins que ces corps puissent être définis rigoureusement.

Le second objet est de donner la manière de reconnoître, d'après une description exacte les formes des corps, et d'en déduire toutes les vérités qui résultent et de leur forme et de leurs positions respectives. (MONGE, 1798, p.5)

A Geometria descritiva tem dois objectos: o primeiro eh dar os methodos para representar sobre uma folha de desenho, que só tem duas dimenções, a saber, comprimento e largura, todos os corpos da natureza, que no espaço occupão três, a saber, o comprimento, largura e profundidade; com tanto porém, que estes corpos se possam definir rigorosamente.

O segundo objecto he dar o modo de reconhecer depois de huma descripção exacta, as fórmes dos mesmos corpos, e deduzir-lhes todas as verdades que resultão, tanto da sua figura, como das suas posições respectivas. (SOUZA, 1812, p.1)

Estas citações anteriores são de obras da época em que a geometria descritiva chegou ao Brasil, introduzida pelas escolas militares. Neste mesmo meio militar Monge divulgou sua obra na França, assim como na escola de formação de professores, a *École Normale*, e na *École Polytechnique* (Gani, 2004).

Nas citações, podemos observar a característica ferramental da geometria descritiva de, na interface bidimensional da folha de papel: descrever formas, deduzir as suas dimensões, tratar de sua posição no espaço (euclidiano) e desta

⁴ Lições de Monge tanto na *École Normale* como na *École Polytechnique*.

posição em relação a outros objetos. A esta característica soma-se a de promover operações sobre a forma, resolvendo graficamente e de maneira sintética, embora Monge fosse conhecedor de métodos analíticos, operações diversas como a de interseção entre poliedros e a seguinte subtração de um deles, expressa na figura 1 que se segue:

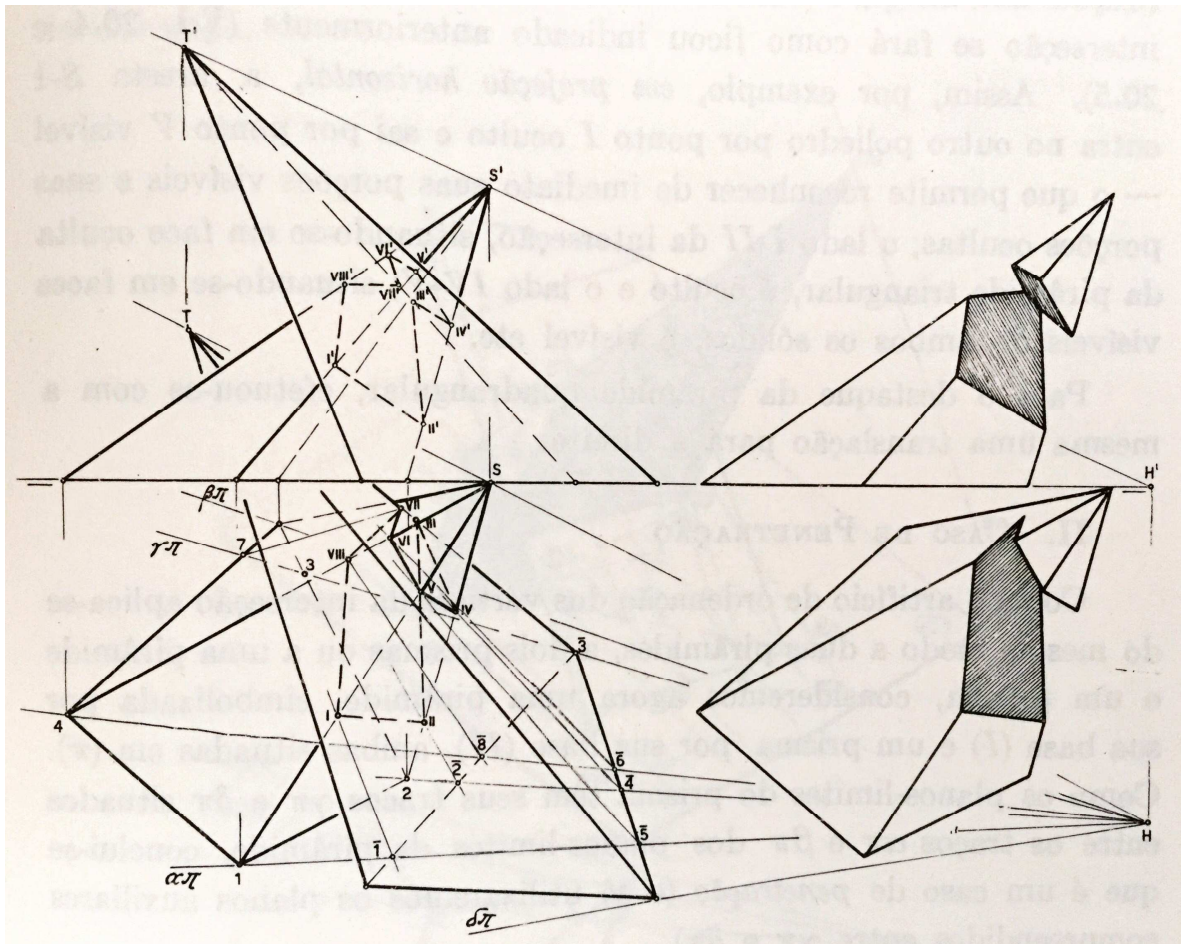


Figura 1: épura de interseção de pirâmides com subtração de uma delas.

Fonte: Pinheiro, 1971, p.23

Outro objetivo da descritiva, expresso na transcrição do texto de Monge, é o de representar objetos de três dimensões em uma mídia de duas dimensões, plana, como é uma folha de papel, que ele chamou de *feuille de dessin*, ou folha de desenho, já incluindo aí o processo gráfico, esta interface é a épura.

Para se chegar à épura (ver figura 2) divide-se o espaço infinito por dois planos igualmente infinitos e perpendiculares entre si, determinam-se quatro diedros, ou regiões onde se poderia localizar qualquer objeto. Os planos recebem as projeções deste objeto, por retas projetantes que passam por todos os pontos do objeto, retas que são perpendiculares aos planos. Retirado o objeto, observa-se que

as projeções do mesmo equivaleriam a visadas de dois observadores ao infinito. A seguir os planos, junto com as projeções, poderiam se superpor, e oferecer a observação conjugada de ambas as projeções, que, combinadas, permitiriam não só representar a forma tridimensional, mas proporcionar uma interface plana possível a se operar esta forma. Configura-se assim a *épura*, interface operacional bidimensional consagrada da geometria descritiva, derivada do sistema diédrico, com seu uso aplicado às formas tridimensionais.

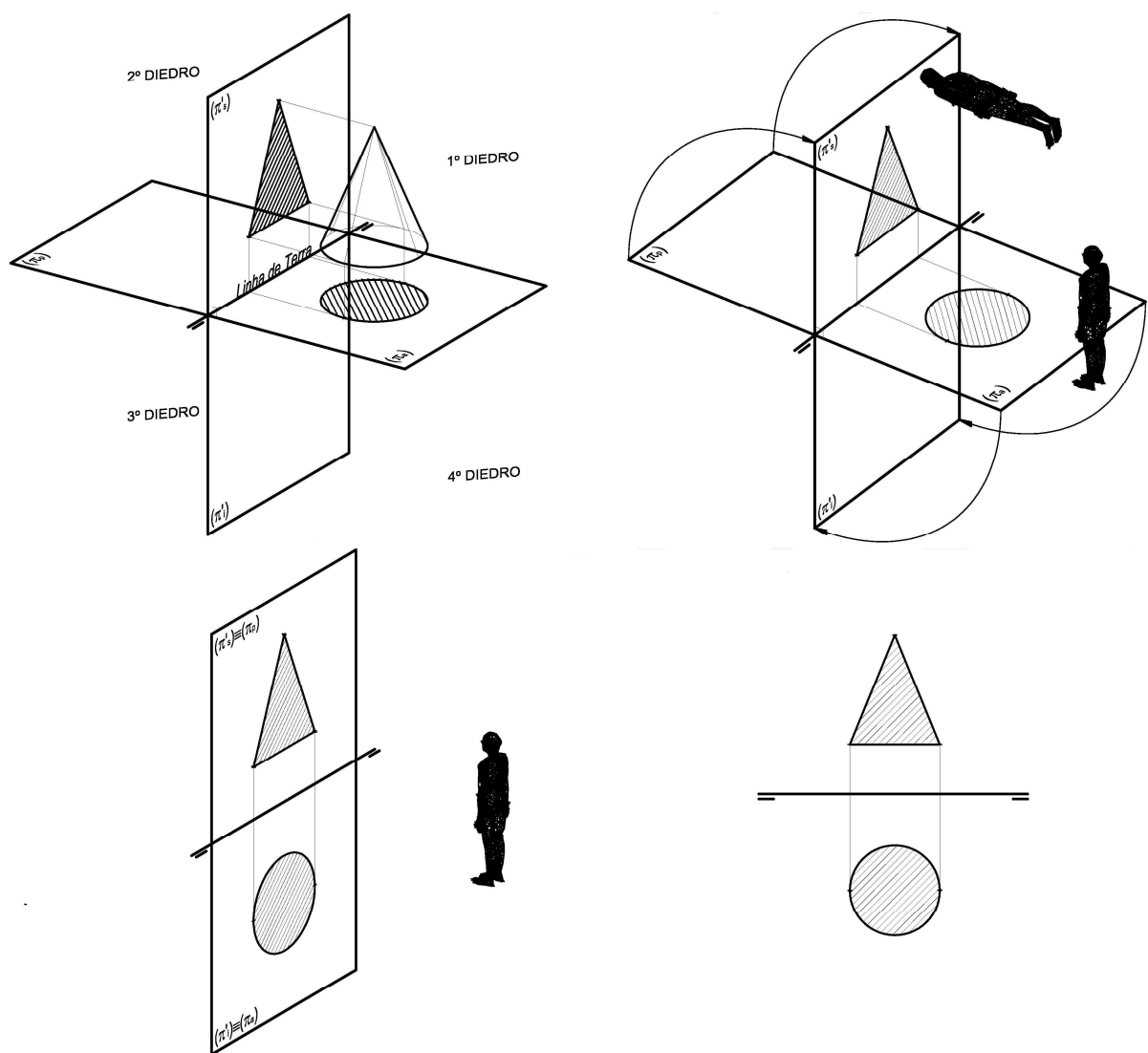


Figura 2: sistema diédrico e *épura*.

Fonte: o autor, 2014

O surgimento da geometria descritiva corresponde a um momento, na matemática, de retomada do estudo da geometria no espaço. Esta retomada, segundo Boyer e Merzbach (2012, p.322), se observou no século XVIII, quando

também houve grande avanço no estudo das superfícies. Os mesmos autores contextualizam a relação da geometria descritiva com os outros campos da matemática, observam que dentre os cursos de Monge na *École Polytechnique* estaria um sobre *aplicação da análise à geometria*, que hoje certamente seria nomeado por *geometria analítica*, também não estaria consolidado o que hoje se conhece como *geometria diferencial*, mas o curso oferecido por Monge seria essencialmente uma introdução a esse campo. Ressalta-se que muito contribuiu Euler⁵ à geometria analítica, anteriormente a Monge, também destacamos que a geometria diferencial só se constituiria como tal com os estudos posteriores de Gauss⁶.

Monge desenvolve em seus cursos uma abordagem integrada dos campos da matemática, a geometria descritiva, a analítica e a diferencial eram vistas “juntas”, outros campos da matemática àquela época, já percebidos como “distintos”, como a álgebra, também foram objeto de seus estudos integrados. Monge, com um de seus discípulos, Hachette (1769-1834), publicam em 1802, no *Journal de l'École Polytechnique*, um artigo sobre *Application d'algèbre à la géométrie*, que retratou a aplicação da álgebra a geometria em um de seus cursos, na escola do referido jornal. Boyer e Merzbach (2012, p.357), chegam a utilizar o termo “*Escola de Monge*”, ao descreverem as contribuições feitas pelos estudantes de Monge da *École Polytechnique*, durante o século XIX, como as de Poncelet⁷, que impulsionou a geometria projetiva, ao conjugar as abordagens analítica e sintética do tema.

Esse aspecto da descritiva de Monge, de ser aberta e integrada a outros campos da matemática, é pouco explorado no ensino de arquitetura e urbanismo, artes, design e até mesmo em engenharia; nestes cursos não é raro que se observe, por exemplo, geometria descritiva e analítica sendo ministradas separadamente. O ensino da descritiva costuma se voltar à aplicação na área gráfica, fundamentando as operações sobre a forma, principalmente as de representação, baseando-se na *épura* e no sistema diédrico. Investiguemos agora como pode ter se estabelecido este viés de fundamentação, particularmente em arquitetura e urbanismo.

⁵ Leonhard Euler (1707-1783), matemático suíço.

⁶ Carl Friedrich Gauss (1777-1855), matemático alemão.

⁷ Jean-Victor Poncelet (1788-1867), matemático francês.

Pérez-Gómez e Pelletier (2000, p.3) apontam que se identificava como trabalho do arquiteto, já desde o século XV, portanto antes da sistematização da geometria descritiva, a tarefa de se produzir desenhos da forma arquitetônica que corresponderem a projeções análogas às da descritiva, contando-se com o observador no infinito, tecnicamente denominadas hoje pela geometria como projeções cilíndrico-ortogonais. Estas representações equivaleriam às plantas, vistas e cortes, tal como são entendidas hoje, embora, àquela época, não se notasse o domínio e o uso corrente da noção de escala, ou, como afirma Carpo (2011 p. 18), sem que se praticasse a noção matemática de infinito nessas representações (ver figura 3).

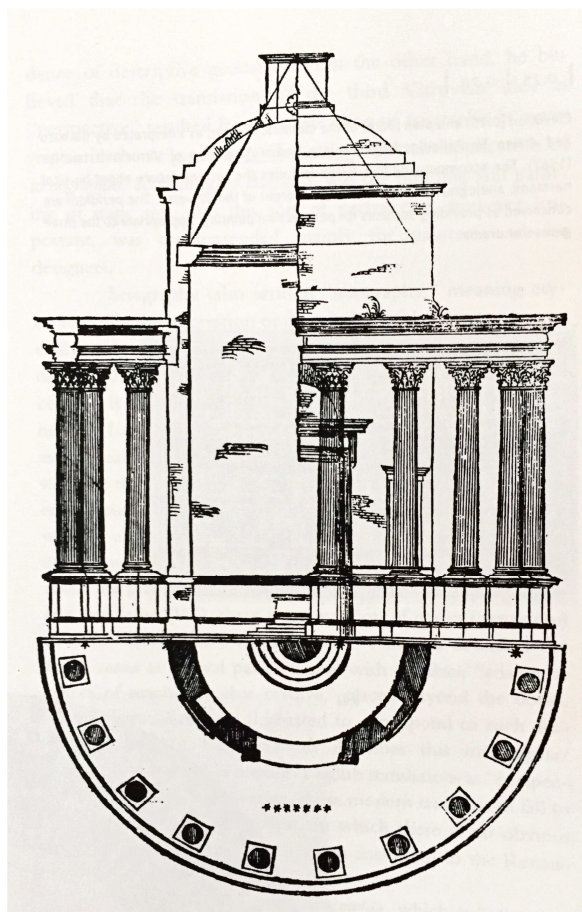


Figura 3: representação simultânea de planta, corte e vista. Autoria de Daniele Bárbaro (1569)
Fonte: Pérez-Gómez e Pelletier, 2000, p.48

Carpo (2011, p. 19) também afirma, que desde fins da idade média e início do Renascimento até os idos de 1800, com Monge, estas representações foram aplicadas em arquitetura e urbanismo sem uma sistematização, encontram-se exemplos que podem variar do aspecto geral da edificação a detalhes, e, a despeito da ausência de sistematização, encontram-se exemplares com traçado rigoroso.

Pérez-Gómez e Pelletier (2000, p.201) trazem este desenho (ver figura 4) de Andrea Pozzo, realizado por volta de 1680, quando havia o entendimento de que para ser um bom arquiteto teria que muito se saber de pintura e de perspectiva.

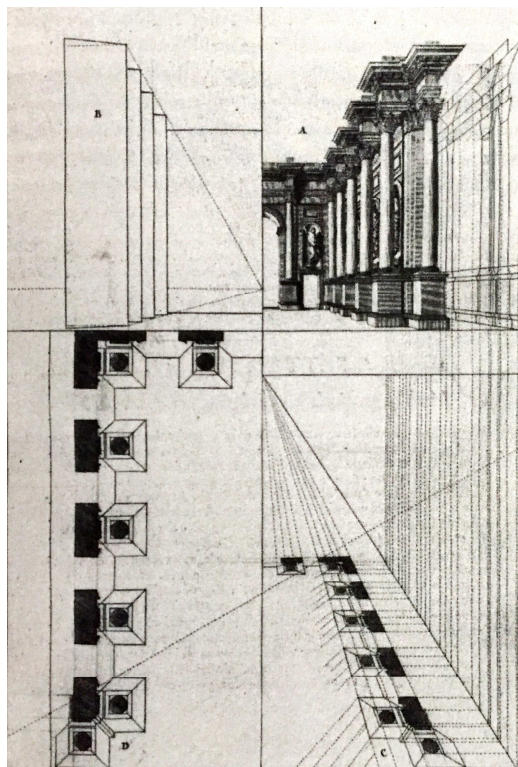


Figura 4: representação simultânea de planta, vista e perspectivas. Autoria de Andrea Pozzo (aprox. 1680)

Fonte: Pérez-Gómez e Pelletier, 2000, p.201

Estes últimos autores argumentam que não só se veria no exemplo uma representação rigorosa de plantas e vistas, Pozzo desenvolve um método de perspectiva que explora as relações entre as diversas representações, faz isso para determinar o melhor ponto de vista em perspectiva, característica que à época do Barroco, além de ser primordial, colocava a perspectiva em um papel central nas representações.

A despeito da existência prévia de desenhos com traçado rigoroso, somente com Monge a prática da confecção de plantas, cortes e vistas encontra na descritiva seu embasamento matemático. Antes de pensarmos em um observador deslocado ao infinito, que em uma representação de arquitetura e urbanismo poderia fazer transformar uma perspectiva cônica em uma vista, podemos pensar em matemática no deslocamento de um centro de projeção ao infinito (ver figura 5), transformando uma projeção cônica (à esquerda da figura) em uma projeção

cilíndrica (à direita da figura), ou mais precisamente, se este deslocamento se der na direção perpendicular ao plano de projeção, em uma projeção cilíndrico-ortogonal.

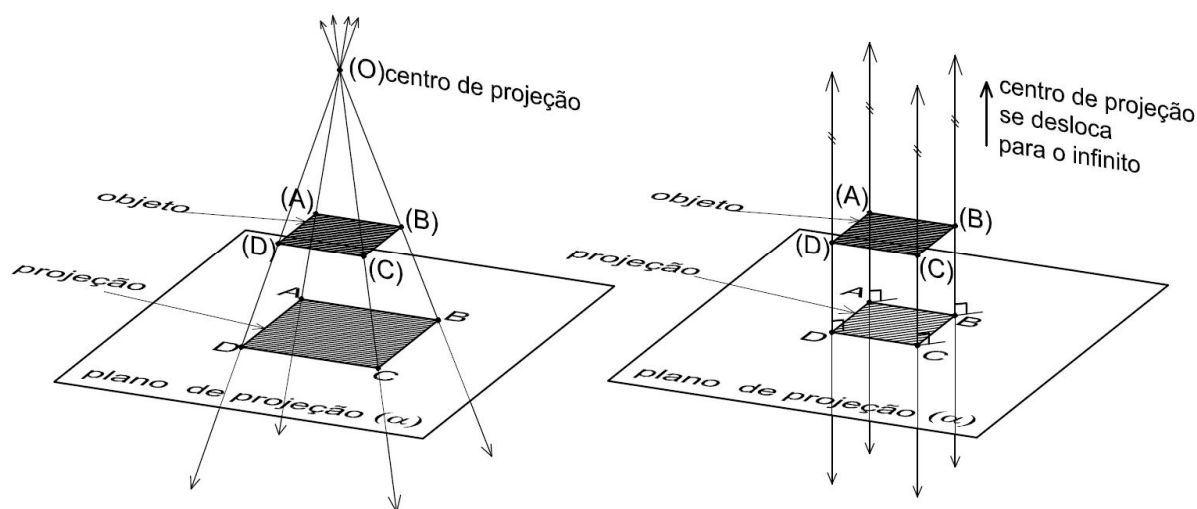


Figura 5: projeção cônica e projeção cilíndrico-ortogonal.

Fonte: o autor, 2016

A analogia do local do centro de projeção com a posição do observador poderia então ser feita, seja à esquerda da figura, com a perspectiva cônica, ou à direita, com a obtenção de plantas, cortes e vistas.

Durand, ex-aluno de Monge, muito contribuiu para a difusão do método mongiano, quando foi professor na *École Polytechnique* no início do século XIX, colaborando para a sua aplicação em arquitetura, artes e engenharia. Este método, que contava com o deslocamento do observador “ao infinito”, foi acompanhado de uma consistente desvalorização da exploração de qualquer ponto de vista cônico, prezava-se o aspecto neutro do observador, um desenho mais técnico e objetivo, cor e adornos nos desenhos eram igualmente evitados. Esse movimento colocaria as representações em plantas, corte e vistas em um novo patamar, ao qual viria se seguir a própria sistematização destas representações em arquitetura e urbanismo.

Uma Europa pós Revolução Industrial também carecia de métodos precisos de desenhar máquinas e ferramentas. O sistema gráfico desenvolvido por Monge se difundiu em vários campos além da arquitetura e urbanismo. Com ele poderíamos ter precisão, obter medidas e resolver o problema das distorções que os outros sistemas de representação, como a perspectiva cônica, traziam.

Há alguns aspectos da descritiva de Monge que costumam ser pouco destacados, além desta abordagem integrada de diversos campos da matemática,

percebe-se na interface gráfica da descritiva algumas propriedades da geometria diferencial que, após uma visualização em *épura*, podem, nesse outro campo da matemática, serem definidas ou desenvolvidas. A própria *épura* permite ser utilizada como uma precisa ferramenta de representação gráfica, de formas advindas do mundo geométrico. Um exemplo é o da representação de curvas e superfícies em *épura*, formas antes expressas por equações, apenas “imaginadas” pelo geômetra, passaram a poder ser “visualizadas”, por meio de sua representação gráfica sistematizada em *épura*, quase dando materialidade a essa forma. As formas tridimensionais da geometria adquiram o *status* de fielmente representáveis, algo que já se oferecia, com o desenho geométrico, para as formas bidimensionais.

Notamos com mais facilidade, em meio geométrico, o seu caráter de atuar como ferramenta de gerar e manipular a forma, geralmente por meio de seções ou interseções, configurando-se como os clássicos “problemas de descritiva”. Quando tratamos de arquitetura e urbanismo, ao se operar a sua representação, já associamos a descritiva a contribuir com a mesma, mas nem sempre nos lembramos do caráter que a descritiva pode ter em ser ferramenta de gerar e manipular esta forma arquitetônica ou urbana.

Matizes à parte, foi o caráter ferramental da descritiva em operar a forma em vários aspectos, não restrita a atuar como ferramenta de representação, que teria contribuído para o triunfo do método mongiano, não só na arquitetura, como também nas artes e engenharia (RÊGO, 2011). Exploramos nesta tese este caráter ferramental.

Cabe aqui um esclarecimento de termos ao propormos a palavra *ferramenta* para a geometria descritiva, esta palavra pode aparecer também quando nos referimos às ferramentas CAD, que são os *software* utilizados em desenho ou modelagem da forma, seja esta forma geométrica ou arquitetônica. A palavra seria notada também em ferramentas de desenho, ou instrumental, que pode ser o compasso utilizado para se traçar uma circunferência em uma folha de papel.

A geometria descritiva opera a forma tridimensional, nos oferece uma ferramenta gráfica sistematizada em uma interface plana, bidimensional, que é a *épura*. Gani (2016) nos mostra que o saber da descritiva vai além da sua interface gráfica, pelo título de sua tese, *A geometria de Gaspard Monge: o método descritivo que prescinde da técnica de dupla projeção ortogonal e independe dos meios de*

representação, já vislumbramos uma geometria que não precise se fixar uma interface gráfica. Épura e descritiva podem se confundir, mas não são sinônimos.

No Brasil, o ensino de descritiva em escolas de arquitetura e urbanismo, costuma contar com livros como os de Rodrigues (1964,1968) e Pinheiro (1971, 1990, 1994). São interpretações dos autores do trabalho de Monge, às vezes podem oferecer problemas mais elaborados, afastando-se das características práticas preconizadas por Monge.

Nem sempre os conteúdos de geometria descritiva expressam a sua autonomia na grade curricular nessas escolas, dando nome a uma disciplina, por vezes compõem, com tópicos diversos, disciplinas com nomes como *sistemas projetivos*. Esses conteúdos estão inseridos na educação gráfica do arquiteto, e podem ser praticados como uma ferramenta gráfica para se operar a forma.

Mas como atua esta ferramenta gráfica? Na figura 6 promove-se, por meio da interface gráfica da épura, uma representação bidimensional dupla e conjugada, que equivale às vistas frontal e superior do mesmo objeto geométrico, na épura se processa uma série de artifícios expressos graficamente por traçados, que levam à solução do problema proposto (interseção de cone e cilindro). Como exemplo temos seções no objeto, por diversos planos que auxiliam a determinar pontos de interseção. Enfim, se aplicam recursos gráficos auxiliares, amparados por conceitos geométricos adequados a se resolver o problema proposto.

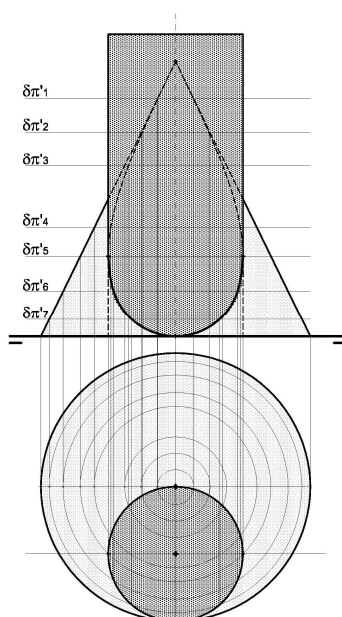


Figura 6: resolução em épura de uma interseção de sólidos

Fonte: http://gd.fau.ufrj.br/exercicios/folhas/gabaritos/gdiex065_a4.jpg-acesso janeiro de 2016

Como produto deste processo temos a dupla projeção cilíndrico-ortogonal conjugada em uma interface 2D. Dessa maneira, o sistema diédrico, com a interface gráfica tradicional da descritiva, a *épura*, acaba podendo atuar como uma ferramenta gráfica.

Há como se fazer uma analogia com arquitetura e urbanismo, seja com o processo executado para se operar e representar a forma arquitetônica, seja com os produtos obtidos ao fim desse processo: plantas, cortes e vistas.

Observamos que a figura 6 trata de uma *épura* inteiramente feita com a ferramenta AutoCAD, repetindo o mesmo processo de se construir as projeções cilíndrico-ortogonais que poderiam ser feitas em desenho analógico, utilizando como instrumental de desenho o lápis, o compasso e um par de esquadros. O desenho da figura 6 passou a ser digital, no entanto foi mantido o mesmo processo do desenho analógico de operar a forma por suas projeções cilíndrico-ortogonais, foi mantida a *épura* da descritiva como linguagem de representação. A respeito de arquitetura e urbanismo, Aish (2013, p.41) chama de *“the 2D drafting era”* quando, na primeira metade dos anos oitenta do século passado, as ferramentas CAD digitais mantiveram a prática da representação, por exemplo, dos edifícios, em múltiplos desenhos 2D.

Posteriormente, as ferramentas CAD utilizadas em arquitetura e urbanismo, puderam oferecer outro processo a se chegar à mesma solução de interseção de cone e cilindro, passaram a poder produzir modelos tridimensionais, mesmo que virtuais, por modelagem digital.

Na figura 7, à esquerda, temos preliminarmente a construção tridimensional virtual dos objetos, os sólidos cone e cilindro, e não a confecção de suas projeções como na figura 6. Em seguida, há como se determinar a interseção entre a superfície que envolve os sólidos, para isso usa-se um comando do software e após um clique no mouse a interseção se faz. Há mesmo como se obter subprodutos advindos dos objetos modelados tridimensionalmente, como as vistas frontal e superior dos modelos, que se veem à direita da figura 7, subprodutos que remetem à *épura* (ver figura 6), um simulacro de projeções cilíndrico-ortogonais, mas que seriam propriamente vistas, superior e frontal, dos objetos modelados. Esse processo é diverso da *épura*, por não haver a necessária intermediação de uma

dupla projeção bidimensional conjugada, isto seja no momento da concepção, da manipulação (ao se promover a interseção) ou da representação da forma.

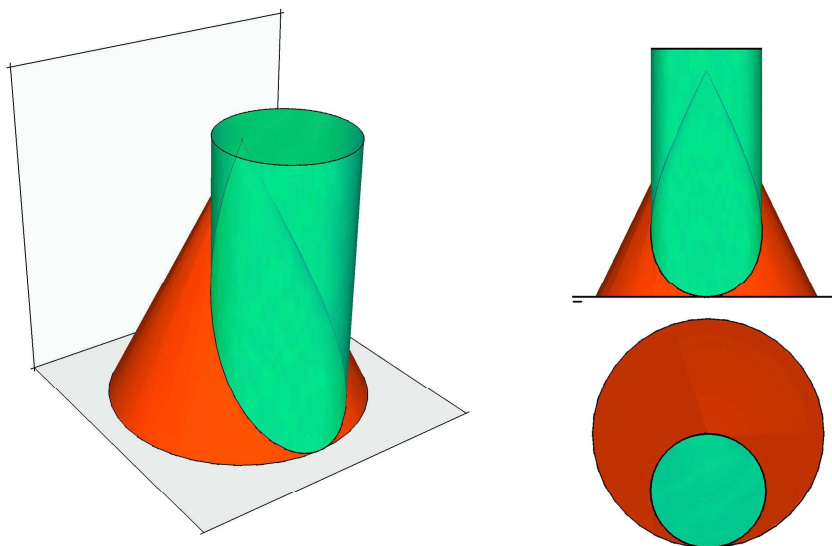


Figura 7: modelagem digital e simulacro de é pura

Fonte: http://gd.fau.ufrj.br/exercicios/ex065_vr_a.htm-acesso janeiro de 2016

Podemos estabelecer uma analogia desse exemplo em arquitetura com as ferramentas BIM (*Building Information Modeling*), não pela característica dos modelos BIM de trazer alguma informação do objeto real ali representado, como o material com o qual será construído, mas por se caracterizar pela construção virtual do objeto (no caso arquitetônico) tridimensional. Operações sobre este objeto, como cortes e simulações de plantas, por obtenção de projeções bidimensionais, partiriam sempre deste modelo tridimensional.

Aish (2013, p.40) sinaliza a segunda metade da década de 1980 como o início da era BIM, faz-se aqui um parêntese de que no Brasil a adesão a estas ferramentas se deu tardiamente. O mesmo autor aponta que, nos anos 1990, ferramentas de modelagem digital, que objetivavam vencer as limitações das ferramentas e do ambiente de projeto BIM, prosperariam. Estas ferramentas incorporariam princípios diversos de geração de formas, apoiadas em scripts de programação ou a outros princípios diversos à descritiva.

Sem entrarmos, neste momento, em um aprofundamento a respeito das ferramentas CAD, nos interessa agora caracterizar que, no âmbito da educação gráfica em arquitetura e urbanismo, a introdução de ferramentas CAD, que não partam da construção de projeções cilíndrico-ortogonais conjugadas, contribuiu para

desequilibrar o papel da descritiva de subsidiar diretamente as operações sobre a forma. A descritiva, com viés operacional, passou a não oferecer uma interface gráfica utilizável em todas as operações sobre a forma, concorrendo com outras que podem executar essas mesmas operações, por meios diferentes, e por vezes com mais facilidade operacional, vide as ferramentas de modelagem 3D.

Destacamos que a passagem do analógico ao digital teve menos peso, nesse desequilíbrio, que a alteração dimensional da interface de 2D para 3D. O aspecto de deixarmos de lado a construção das projeções conjugadas e aderirmos à construção do modelo tridimensional virtual, traz maiores implicações ao ensino de geometria em arquitetura e urbanismo que a mera digitalização dos desenhos 2D.

É recorrente, no ensino de geometria descritiva em curso de arquitetura e urbanismo, que se façam tentativas de transposição da situação geométrica vivida em *épura* para aplicações práticas. Essas tentativas costumam passar por se praticar a redução geométrica da forma arquitetônica ou urbana, simplificando-a ao transformar paredes em planos, volumes em paralelepípedos e quinas em pontos. Essa redução/simplificação já esvazia a forma de outros atributos que são importantes à arquitetura e ao urbanismo, como os culturais, estéticos, funcionais e construtivos.

Podemos tratar essa forma já simplificada, seja geométrica ou arquitetônica, de maneira indistinta. Há muito em comum entre as representações da forma arquitetônica em plantas, vistas e cortes com as da forma geométrica, na *épura*, por meio das projeções cilíndrico-ortogonais conjugadas. A forma arquitetônica ou urbana pode então ser representada em *épura*, sem que se precisemos obedecer a uma normatização gráfica específica de desenho arquitetônico, passando a responder à codificação específica da geometria descritiva.

Como apoio teórico a estes procedimentos, de simplificação geométrica da forma e de tratamento indistinto da forma em *épura*, seja a arquitetônica ou a geométrica, optamos pela adoção dos conceitos de *mundo real* e *mundo projetual* de Mitchell (2008). O uso desses conceitos se mostra apropriado à análise das operações sobre a forma que realizaremos, seja esta geométrica, arquitetônica ou urbana. Outro ponto que nos estimulou a adotá-los foi o de terem sido definidos por Mitchell no campo da arquitetura, além de conjugarem representações a ações de

concepção da forma, ou, em um termo mais geométrico: as ações de geração da forma.

Todos estes processos de concepção e representação da forma, seja geométrica ou arquitetônica reduzida à geométrica, se operam e têm como universo o que Mitchell (2008) define como mundo projetual. Mitchell define este conceito no campo da arquitetura e o diferencia do mundo arquitetônico, ou mundo real, onde existe o edifício. O mundo projetual não pertence ao real e sim ao imaginário, nele há a representação de algo que está por vir a ser real, é o mundo do projeto ou do modelo do edifício (MITCHELL, 2008, p.52).

Mitchell prossegue afirmando que os arquitetos costumam criar implicitamente mundos projetuais. Por exemplo, ao escolherem usar instrumental de desenho como pranchetas, compassos, esquadros e lapiseiras, estabelecem um mundo projetual povoado de símbolos, onde retas e arcos remetem a paredes e a outros elementos do mundo arquitetônico (MITCHELL, 2008, p.52). Na mesma página afirma que quando um arquiteto se utiliza de um sistema CAD, com ele eleger e define uma estrutura de dados com operações a ela associadas, definindo assim o seu mundo projetual. O mesmo autor apresenta um grande repertório possível de mundos projetuais: mundo dos pontos, das linhas, dos planos, das superfícies, dos volumes. Nota-se nestes mundos projetuais uma variedade de possibilidades, tanto no número de dimensões, como na notação utilizada para a representação do mundo real.

Estes conceitos, de mundo projetual e mundo real, podem, por analogia, ser aplicado à Geometria Descritiva, onde a *épura* está relacionada ao mundo projetual e o objeto ali representado ao mundo real. Portanto, consideramos que os processos de concepção e representação da forma, aqui referidos nesta tese, se inserem no universo do projeto, no mundo projetual, não no mundo real.

1.2.1 Processos de Concepção PI2D e PC3D

Tendo como referência os conceitos de Mitchell, definiremos dois processos de concepção da forma. Começamos por considerar que qualquer pessoa, que no mundo projetual conceba ou projete uma forma tridimensional, que remeta ao mundo real ou arquitetônico, usará processos de concepção. Os exemplos já relatados e ilustrados pelas figuras 6 e 7 podem ser lidos como dois desses processos. Optou-se por definir esses dois processos de projeto, ou processos de concepção de objetos (arquitetônicos ou geométricos), como conceitos, e nomeá-los pelas siglas PI2D e PC3D, que podem ser vistas na figura 8:

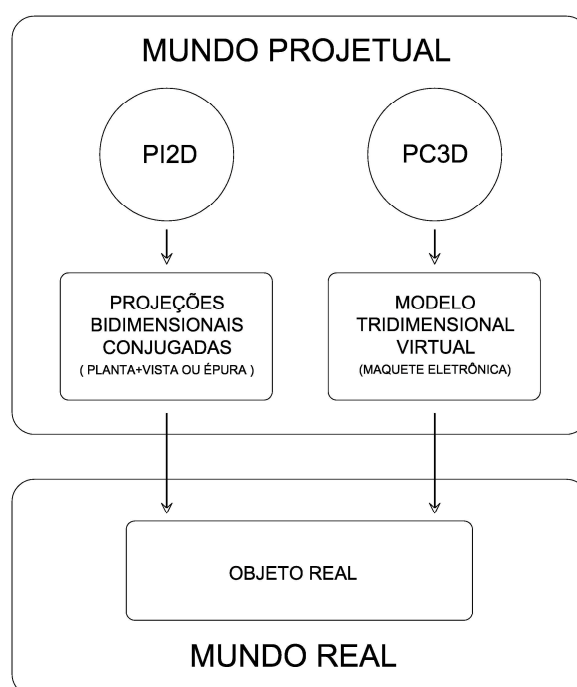


Figura 8: processos de projeto e mundos projetual e real
Fonte: o autor, 2015

O *Processo de Concepção Intermediado por Representações Bidimensionais Conjugadas*, ou **PI2D**, pertence ao mundo projetual. O produto ao fim desse processo pode ser exemplificado por plantas e vistas conjugadas (arquitetura) e pela épura (geometria descritiva).

Os produtos finais remetem a objetos (arquitetônicos ou geométricos) do mundo real. A partir desses produtos, para que haja o completo entendimento do objeto real, há que se fazer uma interpretação conjugando-se ao menos duas das representações bidimensionais deste objeto, exemplos: planta + vista (arquitetura) ou épura, projeção horizontal + projeção vertical (geometria descritiva) (ver figura 8).

Em arquitetura, há que se conjugar ao menos uma planta e uma vista para o entendimento da forma do edifício. A representação em *épura* já traz esta conjugação estabelecida.

Esse conceito de PI2D não abarca todas as representações bidimensionais do objeto, estão excluídas, por exemplo, as representações em perspectiva cônica que, embora sejam representações do mundo projetual, obtidas por processo de projeção bidimensional de um objeto tridimensional, dispensam a necessária interpretação de no mínimo duas projeções conjugadas, para que possa eficientemente comunicar a forma do objeto real.

O *Processo de Concepção por Construção Tridimensional de um Objeto Virtual*, ou **PC3D**, pertence ao mundo projetual. O produto ao fim deste processo pode ser exemplificado por um modelo tridimensional de um edifício construído virtualmente com ferramenta CAD (arquitetura), ou por um modelo geométrico construído virtualmente com a mesma ferramenta digital.

Os produtos finais remetem a objetos (arquitetônicos ou geométricos) do mundo real. A partir destes produtos, para que se busque compreender o objeto real, há que se fazer uma interpretação de maneira diversa da que é feita em PI2D, não sendo obrigatória a conjugação de projeções bidimensionais para que se compreenda a forma o objeto real. A visualização em tela de computador de um modelo tridimensional virtual é um exemplo disso.

Um modelo pode até ser compreendido ao observarmos a imagem do mesmo em perspectiva na tela de um computador, mas é antes de tudo uma estrutura de dados (CARPO, 2011), a perspectiva observada em tela seria um subproduto. Alguns softwares permitem que se produzam subprodutos a partir desse modelo virtual, inclusive plantas e cortes, que seriam meios de representação da forma afeitos ao PI2D.

Estes conceitos, PI2D e PC3D⁸, estariam agora prontos para serem utilizados indistintamente ao se operar a forma, tanto a geométrica como a arquitetônica. Posteriormente, no capítulo três, retornaremos a eles quando da formatação do experimento de pesquisa.

⁸ Para um maior detalhamento destes conceitos ver Marcone e Dias (2014).

1.3 INFLEXÕES: ESPAÇO, FORMA E FERRAMENTAS

Tudo é muito novo, e parece estar acontecendo agora. Operar a forma, seja gerando-a, representando-a, ou construindo-a, pode dar-se de maneira diversa do que se via há alguns anos, a estas mudanças chamaremos de *inflexões*.

Algumas ferramentas CAD podem alterar a interface dimensional, passando da construção de projeções 2D para a modelagem digital 3D, mudança relevante a nosso objeto de estudo e já destacada na seção anterior deste capítulo, que se finalizou com a definição dos processos PI2D e PC3D de se operar a forma.

Ademais, o espaço, e a forma neste espaço, podem se realizar com características por vezes distintas da geometria euclidiana. Observamos atualmente a aplicação da topologia, de algoritmos para se gerar a forma, enfim: um incremento no uso de conceitos matemáticos, até então pouco utilizados nas operações sobre a forma em arquitetura e urbanismo, e, em sua maioria, alheios ao campo da descritiva.

Para nos ajudar a compreender o caráter contemporâneo de operações sobre a forma, destacaremos primeiro algumas das possíveis inflexões, relacionadas ou às **ferramentas gráficas**, ou à **forma**, ou ao **espaço**. Temos que nos lembrar que essas operações ocorreriam por meio do uso das *primeiras*, atuando sobre a *segunda*, tendo como domínio o *terceiro*.

Quanto ao **espaço**, observamos que as ferramentas CAD costumam trazer as coordenadas de referencial cartesiano em suas operações, o que podemos chamar de *coordenadas globais*, expressas à esquerda da figura 9 que vem a seguir, frequentemente utilizam-se as letras (x; y; z) para nomear estas coordenadas, no exemplo da figura temos as coordenadas (5,0; 7,0; 6,0), a nomenclatura equivalente e usual em geometria descritiva é (abscissa; afastamento; cota). Todas as formas no espaço têm no ponto a sua menor porção, cada um desses pontos possui as suas coordenadas globais, em um espaço contínuo e infinito, o espaço global ou espaço euclidiano.

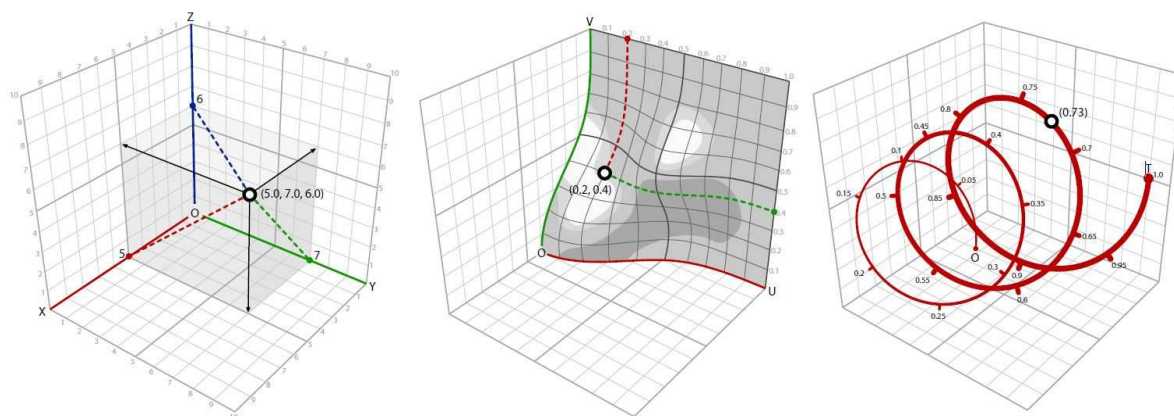


Figura 9: Coordenadas *Globais* (esquerda) e Coordenadas *Locais* (centro e direita)
 Fonte: Rutten, 2007, p.48

Ao centro da figura 9 observamos uma superfície em cinza, graduada em divisões que vão do valor 0 (mínimo) a 1 (máximo), relativas a duas coordenadas, usualmente denominadas de $(u; v)$, também conhecidas como *coordenadas locais*, em nosso exemplo observamos um ponto tendo como coordenadas locais $(0,2; 0,4)$. Este mesmo ponto tem as suas coordenadas globais $(x; y; z)$, cujos valores numéricos são diferentes dos locais. Esta superfície é um exemplo de espaço paramétrico, bidimensional e finito; bidimensional por ter duas coordenadas (locais), espaço finito pois a superfície é limitada pelos valores que vão de 0 a 1, qualquer ponto com coordenadas locais superiores a 1, por exemplo, estaria fora de seu domínio.

O espaço paramétrico pode ter uma, duas ou três dimensões, denominadas pelo trio de coordenadas $(u; v; w)$, à direita da figura 9 temos um espaço paramétrico finito e de uma dimensão, com coordenada (u) indo de 0 a 1. Na imagem, há um ponto em destaque, com o valor dessa coordenada sendo $(0,73)$.

A figura 9 foi reproduzida de uma publicação que auxilia a aprendizagem do conceito de espaço paramétrico, voltada aos usuários do *software* Rhinoceros, como em alguns outros *software*, nele é possível se trabalhar no espaço paramétrico, com as propriedades locais da forma. Isso não é algo unicamente conceitual, o software realmente oferece interface amigável à aplicação do conceito. Os conceitos de propriedade *local* e *global*, no caso aplicado às coordenadas, não são novos e nem teriam surgido com as mais recentes ferramentas CAD, Gauss⁹ já estudara estas propriedades locais de pontos de uma superfície, que independiam

⁹ Carl Friedrich Gauss (1777-1855), matemático alemão.

da sua posição no espaço euclidiano, na primeira metade do século XIX, era, portanto, contemporâneo de Gaspard Monge.

Além dos estudos das propriedades locais, Gauss já teria utilizado outras definições de espaço que não o euclidiano, não o denominando como *paramétrico*, mas fazendo referências a espaços como o *hiperbólico* ou o *elíptico*, o que veremos no exemplo a seguir, definindo assim domínios espaciais distintos do espaço euclidiano, domínios estes próprios a ocorrer uma geometria igualmente distinta da euclidiana, sendo Gauss o primeiro a utilizar o termo e a nomear esta geometria de *geometria não euclidiana*.

Henriques (2013, p.88) nos ilustra com a figura 10 a não aplicação de um dos postulados da geometria euclidiana, quando temos como domínio outros espaços como o hiperbólico ou o elíptico. O postulado de que a distância entre duas linhas paralelas é constante se aplica no espaço euclidiano à esquerda, ao centro e à direita este mesmo postulado é inválido nos espaços hiperbólico ou elíptico; igualmente a natureza das linhas varia nestes espaços, no da esquerda seriam retas, nos do centro e direita as linhas são curvas.

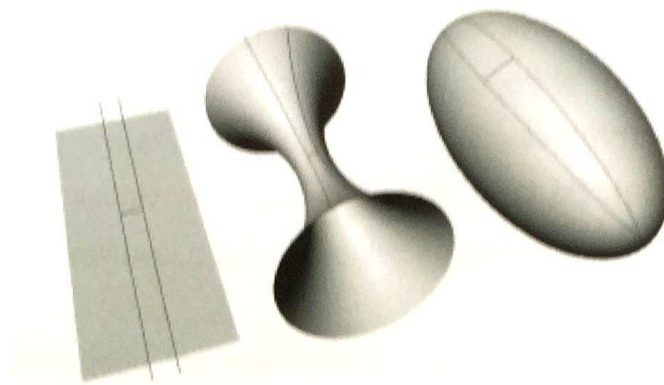


Figura 10: distância entre linhas paralelas nos espaços euclidiano, hiperbólico e elíptico
Fonte: Henriques, 2013, p.88

Quanto à **forma**, observamos em arquitetura e urbanismo o incremento no uso de processos digitais que definem e geram a forma, não apenas atuando como uma modelagem digital que reproduz processos analógicos baseados na geometria espacial, mas operações apoiadas em algoritmos, que nada mais seriam que um conjunto de instruções sequenciadas e finitas que, nas primeiras ferramentas CAD,

majoritariamente eram operados em uma interface de *script* computacionais, tal como observamos na figura 11.

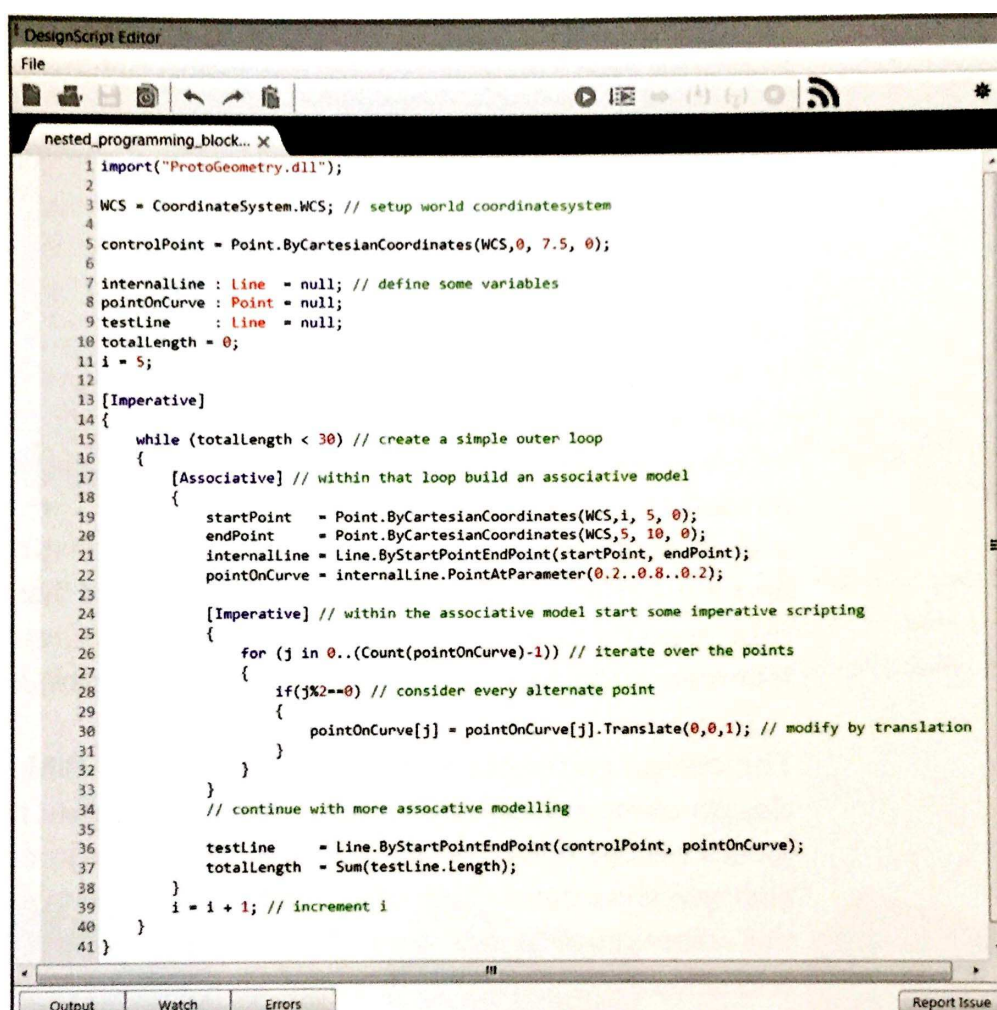


Figura 11: *script* computacional

Fonte: Aish, 2013, p.46

Por meio de editores de *script*, ou janelas dentro de algumas ferramentas CAD, era, e ainda é, possível se programar e dar instruções que levem a operações sobre a forma. Em uma olhada rápida no meio do script da figura 11 podemos notar instruções sobre a definição de pontos por coordenadas globais, ou cartesianas.

Esses processos possibilitam não apenas gerar uma única forma, mas produzir variações da mesma, baseadas numa mesma instrução, mas que pode admitir a alteração de parâmetros que levem a formas diversas, a mais recorrente aplicação desta característica observamos na *geração paramétrica* da forma.

Segundo Kolarevic (2013), em um projeto com estas características menos o arquiteto se fixaria em uma forma final, mais se dedicaria à definição de um conjunto de instruções sequenciadas e finitas, ou *algoritmo*, que pode levar a

diversas formas finais, que se manifestariam mediante a alteração de parâmetros contidos nestas instruções. Essas instruções sequenciadas, que nas duas últimas décadas do século XX costumavam ser escritas no formato de *script* computacionais, receberam interfaces mais amigáveis aos arquitetos na primeira década do século XXI, com a introdução em algumas ferramentas CAD do princípio da *programação visual* (HENRIQUES, 2013). Como exemplo, temos a utilização conjugada dos *software Rhinoceros* e *Grasshopper*, tal como se exhibe no exemplo da figura 12, onde há a construção de um segmento de reta.

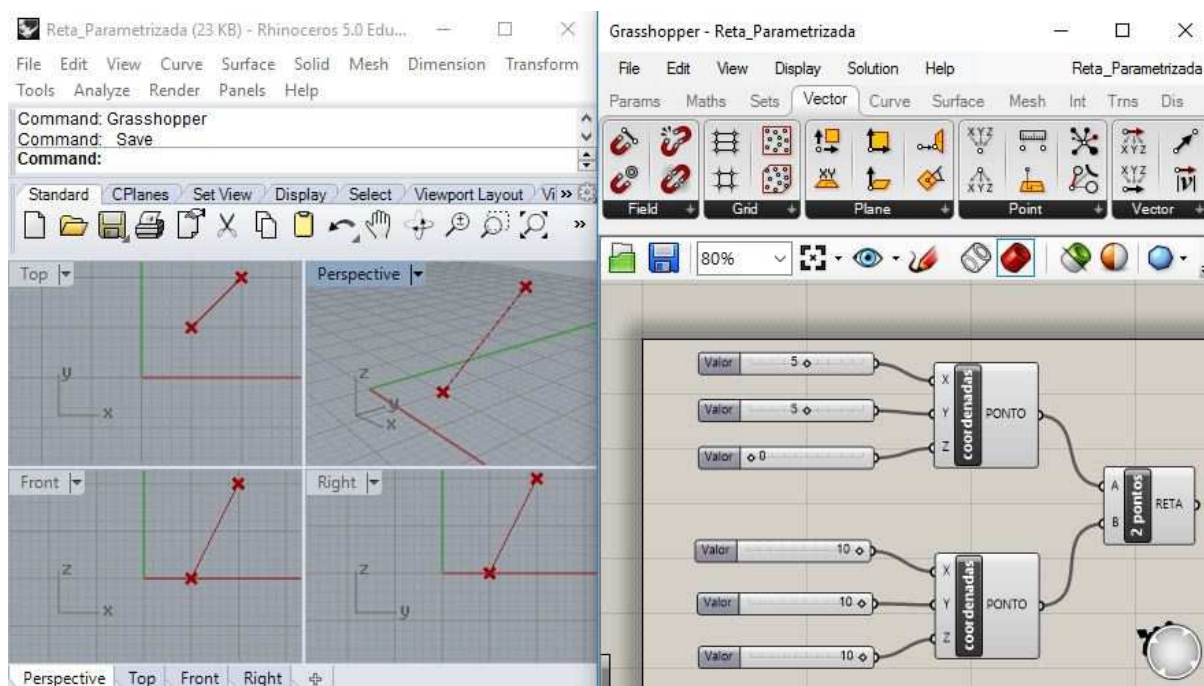


Figura 12: programação visual (Rhinoceros+Grasshopper)

Fonte: o autor, 2016

Neste uso conjugado abrem-se duas janelas, a que temos à direita corresponde ao *Grasshopper*, a da esquerda ao *Rhinoceros*. O *Grasshopper* oferece comandos em formato de caixas que, ligadas em sequência pelo usuário, constrói instruções sequenciadas e finitas, ou algorítmicas, que embutem os *scripts* computacionais por trás de uma programação visual. À esquerda, o *Rhinoceros* oferece uma interface de visualização, de quatro pontos de vista e em tempo real, das instruções dadas na janela da direita, que consistem na construção de um segmento de reta ligando dois pontos dados por suas respectivas coordenadas globais (x; y; z). O primeiro ponto tem coordenadas (5; 5; 0) e o segundo (10; 10; 10); a alteração de qualquer um destes valores produz a mudança de lugar do(s) ponto(s) em tempo real, modificando a posição e forma final do objeto, que no caso

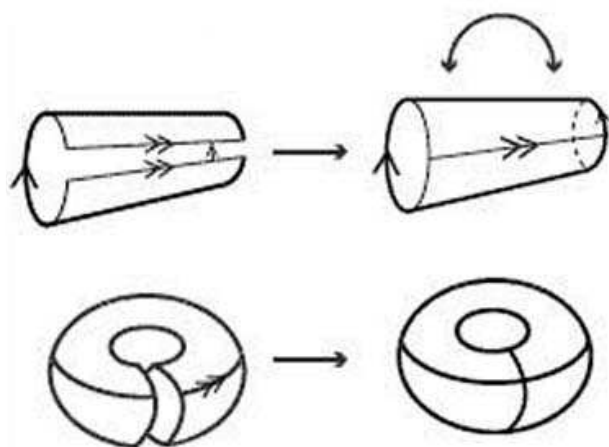
é um segmento de reta. O segmento de reta é então *parametrizado*, o algoritmo é a sua “*receita*” e foi construído por programação visual. Desse jeito se evitam os *scripts*, mais afeitos a programadores de computador que a arquitetos, facilitando a estes últimos a utilização de algoritmos e parametrização em projeto.

Carpo (2011) faz uma leitura da forma arquitetônica no ambiente digital ressaltando que *podemos* observar a matemática em plena ação nos *software*, em ação e sendo utilizada mesmo pelos arquitetos que não tenham pleno domínio da matemática. A forma perderia a imutabilidade que, nas ferramentas analógicas, seria necessária para que se produzisse o que Carpo chama de *inprint* do edifício, uma *impressão* ou *projeção* do edifício, que teria caráter *estático*, como exemplo disso temos as plantas baixas em arquitetura. Carpo (2011, p.78) chega a classificar a forma digital como “*holográfica*”, e, assim como Kolarevic (2013), afirma que o projeto de arquitetura tende a se converter na construção de arquivos digitais, repletos de informações que se prestariam a projeto e à construção, uma massa de dados que pode resultar em formas dinâmicas, variáveis, sujeitas a uma regra básica de geração: *algorítmica*, admitindo variações: *parametrizável*.

Essa forma, para ser variável, veio se valer não apenas da parametrização, mas também das transformações topológicas. A topologia não é nova, estudos desse tema já se avolumavam no início do século XIX, mas é igualmente outro tópico matemático que ressurgue nas operações sobre a forma arquitetônica, e que teve a sua aplicação facilitada pelas recentes ferramentas CAD.

Sem nos aprofundarmos em longas explicações matemáticas, podemos compreender a topologia¹⁰ como o estudo das propriedades intrínsecas de uma forma geométrica que se mantém constantes, mesmo quando há alguma alteração quanto ao tamanho ou ao formato dessa mesma forma geométrica. A figura 13 mostra como se poderia chegar à forma de um toro submetendo uma folha de papel a algumas transformações topológicas; é um exemplo conceitual, visto que para fazer esta operação a folha teria que ser elástica, se distendendo em alguns pontos e se contraindo em outros.

¹⁰ Para saber mais sobre topologia consultar Pottmann et al. (2007, pp. 517-529).



Figuras 13 e 14: da folha de papel ao toro / toro sob transformação topológica

Fontes: <https://www.learner.org/courses/mathilluminated/images/units/4/makets.png> (acesso em 18/12/2016) / <http://cdn.archinect.net/images/650x/5b/5b8cdc5f9c74a8d0ce5862939d08fe94.jpg> (acesso em 18/12/2016)

Na figura 14 temos o *Phoenix International Media Center*, em Pequim, China, projeto de *BIAD Ufo Architects*, exemplo do toro obtido ao fim do processo que se vê na figura 13, submetido agora a uma segunda transformação topológica.

Algumas abordagens teóricas em arquitetura relacionam características destas formas produzidas em ambiente digital a alguns conceitos constantes, por exemplo, nos trabalhos de Deleuze (1993), que é filósofo. Características como a *continuidade* e a *fluidez* (das curvas e superfícies) ou a *variedade* (geração paramétrica) a partir de uma mesma *regra* (algoritmo). Bernard Cache (PERRELLA; CACHE, 2012) apoia-se no livro *The Fold: Leibniz and the Baroque* de Deleuze (1993) e utiliza *fold* para se referir a esta continuidade da forma, e *objetile* para se referir a esta forma variável, indefinida, mutável e apta a receber transformações topológicas e paramétricas. Ressaltamos que esta pesquisa se concentrará na manifestação geométrica destes conceitos, expressa nas formas via ferramentas gráficas.

Um termo mais ligado a computação para definir esta forma seria o de *Binary Large Object* (BLOB), ou *blobs* (CARPO, 2011), (RAHIM; JAMELLE, 2012). *Blobs*. Em computação, significa uma massa de dados, binária, zero ou um, sem uma forma definida. Este termo acabou sendo utilizado também para nomear alguns edifícios com formas arredondadas, não simétricas, geradas em ambiente computacional, alguns o atribuem a ter sido cunhado por Greg Lynn, professor da

universidade de Viena e um dos pioneiros da arquitetura em ambiente digital, mas é de fato um termo computacional.

Quanto às **ferramentas gráficas**, destacamos que atualmente as ferramentas CAD podem proporcionar ao arquiteto uma gama de usos, que pode ir de uma mera digitalização de um desenho, antes analógico, à alteração completa do processo de projeto. Hoje temos já alguns *software* voltados a aplicação em arquitetura e urbanismo, mas nem sempre foi assim. Nas duas últimas décadas do século XX, escritórios como os do arquiteto canadense Frank Gehry utilizavam *software* como o CATIA, *Computer-Aided Three dimensional Interactive Application*, quando esta ferramenta CAD ainda era voltada a indústria aeronáutica (BARKI, 2003). Isso demandava uma equipe de profissionais específica que adaptava a ferramenta a um novo uso, eventualmente constituída por programadores aptos a trabalhar com *script* computacionais, fora o grande investimento, necessário em *hardware*, para suportar estas ferramentas digitais. Hoje, na segunda década do século XXI, já é possível a um arquiteto operar diretamente uma ferramenta CAD sem adaptações complicadas, ou que demandem necessariamente profissionais de outras áreas, esse arquiteto teria acesso, a um custo razoável, tanto a *hardware* como a *software*.

Atualmente é comum que se utilizem termos como *arquitetura computacional* ou *arquitetura paramétrica*, sem nem sempre nos detemos para ver o que esses termos possam realmente significar; ou é comum que se compreenda o computador, ou a utilização de um *software* específico, como o único ambiente a ocorrer uma ou outra operação computacional, alguns pesquisadores vêm nos ajudar a esclarecer estas questões.

Terzidis (2006), em seu livro *Algorithmic Architecture*, que poderíamos traduzir por *Arquitetura Algorítmica*, ou, como nos parece mais apropriado, por *Arquitetura Computacional*, diferencia a *informatização* em um processo de projeto da prática da real *computação* neste mesmo processo. O autor diz que a informatização passaria por processar e armazenar informação em meio computacional, geralmente envolvendo a automação, conversão e digitalização de processos anteriormente concebidos e definidos; em outro extremo teríamos uma arquitetura verdadeiramente computacional ou algorítmica, que incorpora não só princípios mais recentes, como o da parametrização na geração da forma, mas abre

novos caminhos ao projeto, ao incorporar não só o uso de ferramentas digitais, mas operações computacionais em projeto. A aplicação do conceito computacional de algoritmo genético em arquitetura é exemplo disso, o computador pode ser utilizado para gerar múltiplas soluções de projeto, igualmente pode ser alimentado de parâmetros de escolha para as melhores delas e descartar as menos aptas, tal como na seleção natural darwinista, com base nisso pode elencar e classificar algumas das soluções e oferecê-las ao arquiteto para que este faça a escolha final, isso afeta a árvore de decisões do arquiteto em processo de projeto.

Mitchell (2008), ao publicar a primeira edição de seu livro *A lógica da Arquitetura* em 1990, já se preocupava em estabelecer bases conceituais para a utilização de operações computacionais em projetos de arquitetura. À época não encontrava uma oferta de ferramentas digitais, que lhe proporcionasse maciçamente a aplicação destes conceitos, ao menos não da maneira como Terzidis em 2006 já poderia dispor; isso não o impediu de desenvolver seu estudo de operações computacionais mesmo em meio analógico. Mitchell, para sermos mais exatos, estudou a aplicação de operações computacionais, indiferente ao meio ser analógico ou digital.

Terzidis (2006) e Mitchell (2008) nos mostram o quão amplo pode ser a compreensão do termo *arquitetura computacional*, em nosso estudo nos concentraremos nas alterações das ferramentas gráficas, que têm se caracterizado da migração do analógico para o digital, sem considerarmos as possibilidades de inflexões computacionais mais amplas que estas no processo de projeto.

O ato de Mitchell, de realizar e estudar operações computacionais em meio analógico, nos alerta para o fato de frequentemente observarmos, nesse momento de mudança no uso das ferramentas de desenho, de analógicas para digitais, a formação de binômios, como o *digital-computacional*. Temos que nos lembrar que operações computacionais podem ser feitas também em meio analógico.

Da mesma maneira, a utilização de termos como *arquitetura paramétrica* não pode ser associado unicamente a algumas ferramentas CAD, quando estas aplicam a parametrização na geração da forma arquitetônica; na Grécia Antiga observamos que a definição final da forma de uma coluna de ordem dórica, por exemplo, era determinada por uma série de regras finitas e bem estabelecidas

aplicadas em série, portanto um *algoritmo*, regras que tinham como primeiro parâmetro o valor do diâmetro desta coluna, alterado este valor as dimensões da coluna se alterariam por consequência, é uma aplicação de algoritmos e parametrização na geração da forma em ambiente analógico.

Carpo (2011) nos mostra na figura 15 uma precisa reconstrução gráfica, realizada em nossos dias, de um mapa de Roma tal como era em 1430, seguindo as instruções textuais de Alberti¹¹, baseadas em coordenadas polares constantes em seu trabalho deste mesmo ano, intitulado *Descriptio urbis Romae*.

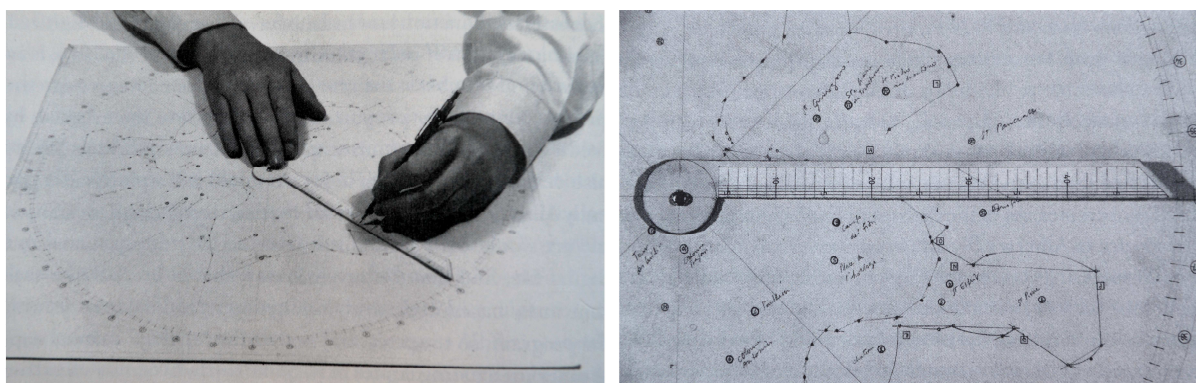


Figura 15: reconstrução de mapa de Roma de 1430 de Alberti
Fonte: Carpo, 2011, p.56

Alberti objetivara, em 1430, que pudesse não só confeccionar um mapa preciso de Roma, que este mapa pudesse ser reproduzido fielmente a qualquer tempo, mantendo-se a precisão e a escala, e seu objetivo foi alcançado em pleno século XXI.

Vinte e cinco anos antes da invenção da imprensa, Alberti se deparara com o problema da reprodução manual imprecisa de mapas, ou mesmo de textos por copistas; sua estratégia a resolver este problema foi criar uma grande lista de números, com coordenadas polares, e instruções específicas de sua utilização. Carpo (2011) defende que esta seria uma verdadeira *digitalização* da forma, naturalmente sem o uso de qualquer computador.

Não sabemos se Alberti usaria este mesmo recurso poucos anos depois, com a invenção da imprensa, ou seis séculos depois, tendo acesso às ferramentas CAD, mas a sua estratégia para resolver o problema nos mostra uma bem sucedida adequação ao ferramental disponível no momento, no ano de 1430, a se chegar à finalidade proposta; o posterior desenvolvimento de alguma técnica poderia até fazer

¹¹ Leon Battista Alberti (1404-1472), arquiteto, teórico de arte e humanista italiano.

com que adotasse um procedimento diverso. Isso nos alerta para a relação que existe entre acesso a alguma técnica, ou ferramenta, e a escolha de determinados procedimentos, neste caso com fins à representação precisa da forma.

Voltando ao termo *inflexões*, atualmente assistimos a uma aproximação do arquiteto com as questões tectônicas, testando-as e executando-as, mesmo que como um protótipo 1:1, experimentando as soluções e não apenas indicando como deverão ser construídas por terceiros, por meio de representações em desenhos. A prototipagem rápida e demais processos vinculados às ferramentas digitais vêm apoiar esse movimento, eventualmente até combinando soluções novas com técnicas tradicionais de construir a forma, constituindo soluções híbridas, analógicas e digitais. Podemos nos indagar o quanto as ferramentas CAD podem contribuir a esta aproximação.

Carpo (2011) argumenta, numa visão histórica, que aborda a dinâmica dos processos de representação da forma arquitetônica, que assistimos em arquitetura a uma reaproximação das questões tectônicas. Diz o autor que a prática arquitetônica teve seu distanciamento da obra, caracterizado pela primeira vez no ocidente, pela prática arquitetônica de Alberti. Esse pesquisador define o que chama de *Paradigma Albertiano*, com a autoria do projeto sendo dada ao arquiteto quando este executa a notação precisa, em projeções bidimensionais sem deformações e em escala, repletas de informações precisas sobre o objeto que virá a ser construído, um *inprint* do edifício.

Carpo faz um paralelo com a invenção da imprensa, que teria ocorrido à mesma época da definição deste paradigma. Uma vez estando o edifício precisamente representado, a obra do arquiteto passa a ser o projeto, condição propícia ao arquiteto se afastar da obra. Argumenta que esta separação em muito seria estimulada posteriormente, pela resolução notacional das representações das formas em arquitetura, principalmente a partir de fins do século XVIII, com as notações precisas da forma fundamentadas na geometria descritiva de Monge.

Carpo segue sua argumentação afirmando que a modelagem digital reaproximaria o arquiteto das questões construtivas, a começar pela característica do objeto arquitetônico ser construído, mesmo que digitalmente, em três dimensões e não apenas traduzido pelo arquiteto em projeções bidimensionais. Outro aspecto das tecnologias digitais que aproximaria o projetar do construir seriam processos

como o de prototipagem digital, destinado à execução de maquetes e protótipos, que favoreceria a construção experimental de algo recém-projetado e ainda não construído, para não se falar da construção do próprio edifício, em processos que envolvam a fabricação digital em obra.

As ferramentas CAD podem apresentar vários caminhos de se operar a forma, mas cada uma delas pode facilitar sobremaneira a escolha de um ou de outro caminho específico, enquanto algumas ferramentas nos oferecem a interface amigável a se construir plantas, cortes e vistas, outras nos favorecem a modelagem digital, já outras tantas a aplicarmos algoritmos que nos permita, por exemplo, a parametrização na geração da forma. As ferramentas CAD nos oferecem, hoje, não a descoberta de novos conceitos matemáticos e geométricos, mas sim a oportunidade de aplicar diversos desses conceitos por meio de interfaces relativamente simplificadas, nas operações com a forma.

Não se pode garantir que todos estes caminhos ocorram em um mesmo projeto arquitetônico ou urbano, nem que essas *inflexões* relativas a forma e a espaço também aconteçam em todos os projetos, mais do que mudanças assistimos a um acréscimo de possibilidades em ambiente de projeto relativas a estes tópicos. Hoje, temos a convivência de múltiplos processos de se operar a forma, com o uso de diversas ferramentas gráficas: digitais e mesmo analógicas, o que observamos é uma crescente facilitação ao acesso dos arquitetos a ambientes de projeto propícios a que estas operações variadas e inflexões se manifestem, com o igual amplo acesso ao uso de diversas ferramentas CAD.

Na seção seguinte desse capítulo, exploraremos alguns exemplos contemporâneos de operações sobre a forma arquitetônica, neles poderemos observar a manifestação de algumas dessas inflexões em projeto de arquitetura.

1.4 OPERAÇÕES

Vamos nos dirigir agora a algumas práticas contemporâneas observadas nas operações sobre a forma, sem nos determos a alguma ferramenta específica, mas que sejam notadamente operações fomentadas pelas ferramentas CAD utilizadas em arquitetura e urbanismo; destacaremos exemplos e apontaremos nestas práticas, sempre que possível, as questões matemáticas e geométricas.

Devemos salientar a temporalidade das ferramentas CAD, isto influencia no caráter das próprias operações que venham a executar; algo do que destacaremos a seguir poderá parecer em poucos anos obsoleto, ou há poucos anos atrás era inacessível a um profissional de arquitetura e urbanismo.

Começamos pela *geração paramétrica* da forma, (ver figura 16):

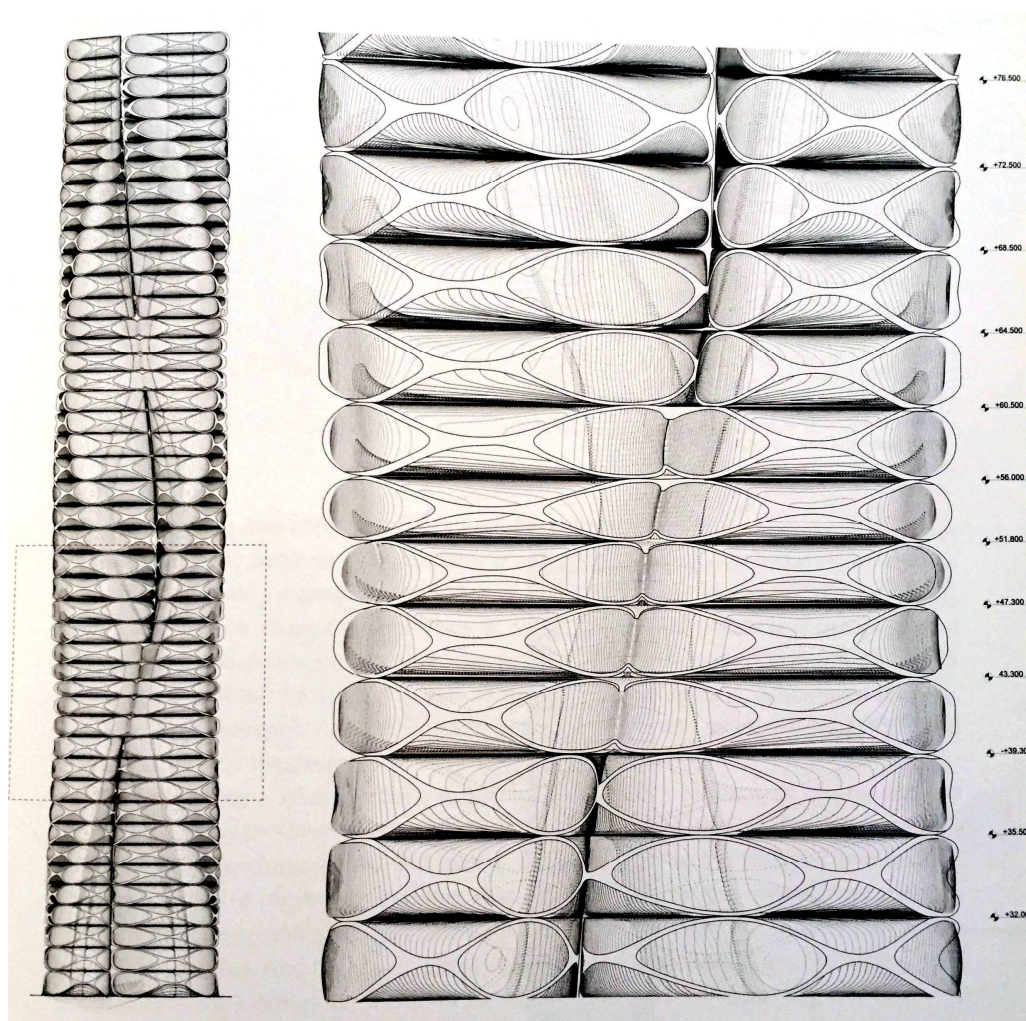
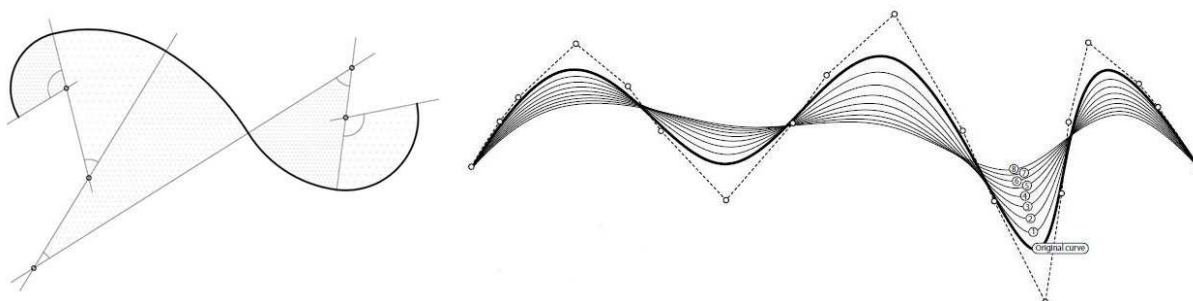


Figura 16: geração paramétrica em edifício residencial – fachada e detalhe ampliado.

Fonte: Rahim e Jamelle, 2012, p.215

Na seção anterior deste capítulo já nos detivemos o suficiente na *parametrização* com Carpo (2011) e Terzidis (2006), nos faltava um exemplo traduzido em projeto e em imagem. Neste exemplo da figura 16, um edifício residencial em Dubai, temos a tradução formal dos conceitos de geração paramétrica da forma, via algoritmos. Notamos, por trás da variação que ocorre entre os pavimentos-tipo, a gênese comum da produção de cada pavimento, porém há uma outra regra que produz a variedade, tornando cada pavimento único. O arquiteto certamente pôde dispor de algo que a imagem não mostra, que é a facilidade de alterar alguns parâmetros no momento de projeto, mantendo outros que fixos (como o pé-direito). A ferramenta CAD exibiria, em tempo real, seguidas soluções formais, à medida que a alteração dos parâmetros ocorresse. Este recurso, do *design* paramétrico, facilita sobremaneira os estudos formais em projeto.

A *continuidade* é outra propriedade da forma em ambiente digital já tratada na seção anterior (PERRELLA; CACHE, 2012), vamos primeiramente analisar como ela se opera nas curvas. Em ambiente analógico, ou nas primeiras ferramentas CAD, é usual que se garanta a continuidade das curvas, por exemplo, concatenando vários centros de curvatura de arcos de circunferências (figura 17). As ferramentas digitais passaram a facilitar que se manipule pontos e retas de controle obtendo variações na forma de uma curva em tempo real, sem que percamos a continuidade da mesma (figura 18). Amplia-se, inclusive, o acesso a um repertório de curvas e de pontos e retas de controle, que não se restringiria a arcos de circunferência e centros de curvatura.



Figuras 17 / 18: curva por centro de curvatura / curva por ponto e retas de controle
Fontes: o autor, 2016 / Rutten, 2007, p.43

Este repertório de curvas, a manter a continuidade com pontos e retas de controle, veio se diversificando ao longo do tempo, na figura 19 temos três destas curvas:

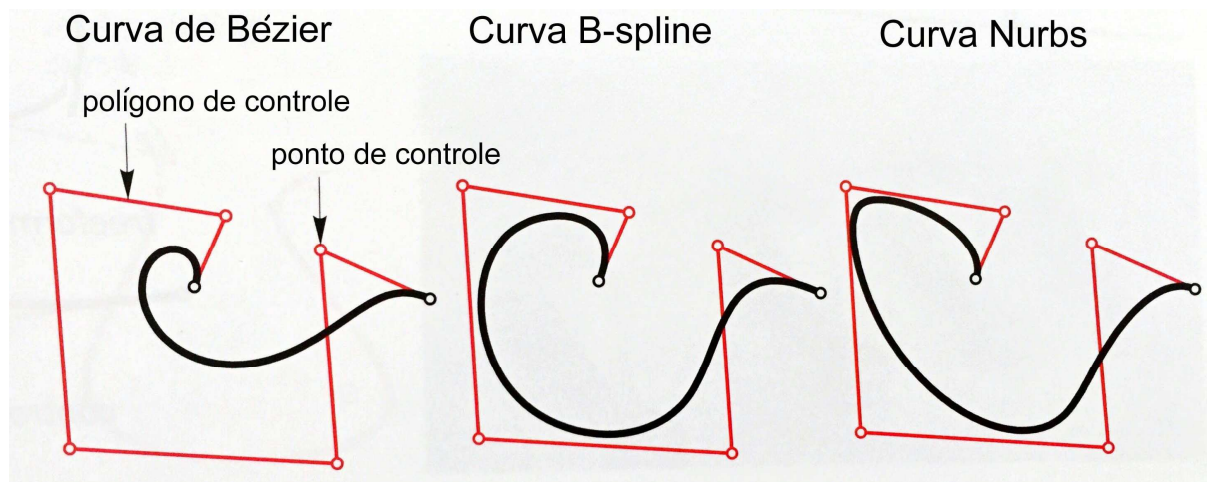


Figura 19: continuidade - retas e pontos de controle em diferentes curvas
Fonte: Pottmann et al., 2007, p.255

Pottmann et al. (2007, p.255), além de nos mostrar as curvas mais utilizadas em ferramentas CAD, nos descreve toda a geometria que há por trás delas, que determina, para idênticos parâmetros de pontos e reta, resultados distintos. Sem entrar em especificidades geométricas que determinam essas diferenças¹², observamos que estas curvas são operadas por ferramentas CAD que acabam por embutir os conceitos matemáticos que provocam essas diferenças. Ao usuário da ferramenta digital basta, com um clique do mouse, mover pontos e retas, acompanhando em tela de computador, em tempo real, a forma resultante. Visto assim, mesmo um leigo executa operações matemáticas. Em termos operacionais, o usuário da ferramenta CAD utilizaria três conjuntos de conceitos matemáticos distintos, com a mesma interface oferecida pela ferramenta CAD.

Essas curvas começaram a ser estudadas nos anos 1950, nos anos 1960 foram utilizadas na indústria automotiva e naval, a produzir as curvaturas das carcaças de carros e navios. Foram incorporadas inicialmente pelas ferramentas CAD voltada a estes fins, e, mais ativamente, ao fim dos anos 1980, a ferramentas voltadas também à arquitetura e urbanismo. Por questões matemáticas intrínsecas a cada uma delas, as curvas *Non Uniform Rational Basis Spline* (NURBS), ou curvas

¹² Para saber mais sobre estas curvas consultar Pottmann et al. (2007, pp. 253-283).

NURBS, melhor se ajustam a operar superfícies geométricas, daí serem as mais utilizadas.

A característica de continuidade também se expressa em superfícies (ver figura 20), onde uma malha de nove quadriláteros, com pontos e retas de controle, define uma única superfície contínua:

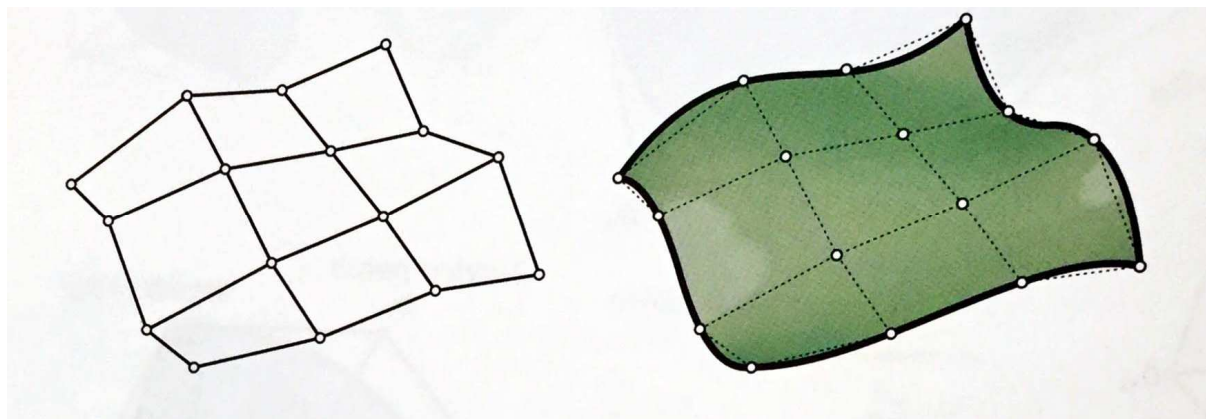


Figura 20: continuidade - retas e pontos de controle em superfície
Fonte: Pottmann et al., 2007, p.380

Henriques (2013) resume a aplicação destas curvas nas ferramentas CAD, afirmando que enquanto as primeiras ferramentas trabalhavam com poligonais, ou *polylines*, ligando coordenadas com referencial cartesiano e operando a geometria euclidiana, as mais recentes ferramentas CAD caminharam para a utilização de uma geometria topológica, com referencial local, com curvas e superfícies contínuas e interdependentes baseada em NURBS, de geração paramétrica (HENRIQUES, 2013).

Esta relação de *continuidade* de curvas e superfícies, e a *interdependência* entre esses elementos, podem ser exemplificadas ao voltarmos a figura 16 e observarmos as longas curvas que sobem pela fachada do edifício residencial, fachada composta por diversas superfícies. Em projeto, os arquitetos puderam alterar parâmetros, e as formas na fachada sofreram diversas transformações topológicas em tempo real, até que se conformasse a solução escolhida. Durante todo o processo, curvas e superfícies mantiveram a sua continuidade, pelas relações de interdependência, a despeito das coordenadas globais dos pontos destas curvas e superfícies, de referencial cartesiano, sofrerem alterações. Eventuais parâmetros de controle específicos para as superfícies ou

curvas, como pontos e retas de controle, podem também ficar implícitos nessas operações, nem sempre são facilmente identificados.

Ao nos voltarmos à *materialização* da forma arquitetônica, algumas questões geométricas se mostram relevantes, como a de diferenciarmos uma superfície entre *planificável* ou *desenvolvível* de uma outra opção, a que esta seja *não planificável* ou *reversa*. A superfície desenvolvível pode oferecer algumas facilidades em sua construção, por isso é desejável que já possamos identificá-la na etapa de projeto.

Rodrigues (1968, p.270), nos mostra um teorema: se a superfície retilínea é desenvolvível, o plano tangente contém a geratriz e é um e único plano ao longo dessa mesma geratriz. Este teorema é usual em geometria descritiva para identificar as superfícies desenvolvíveis; usual também em descritiva é que se faça o traçado deste único plano tangente, utilizando-se a interface da épura, demonstrando assim esta propriedade da superfície. Sem recorrer a alguma épura, e sim à figura 21, exibem-se ali três superfícies desenvolvíveis, a saber: cilíndrica, cônica e do helicóide desenvolvível. Podemos também observar, nessas superfícies, o plano tangente único ao longo de toda a geratriz retilínea.

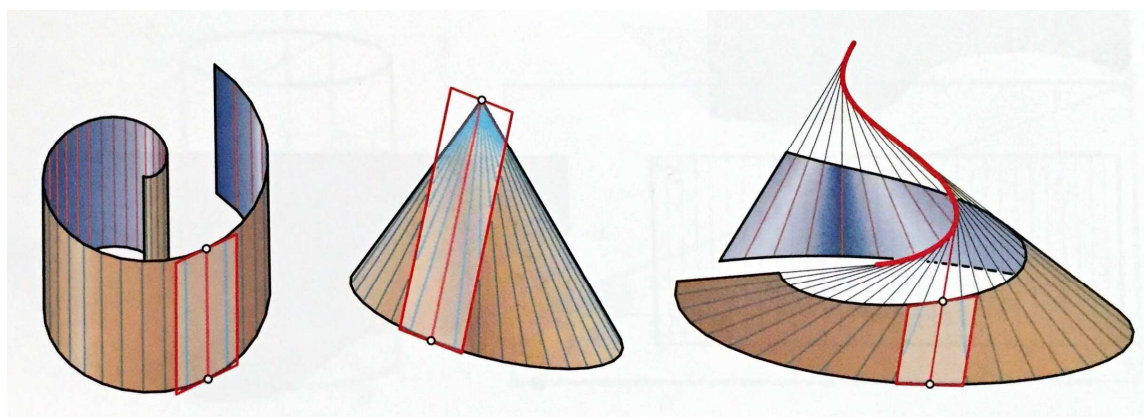


Figura 21: plano tangente e superfícies desenvolvíveis
Fonte: Pottmann et al., 2007, p.535

Se a descritiva se apoia nesse teorema, observamos algumas ferramentas CAD apoiando-se, por exemplo, nas curvaturas gaussianas para diferenciar superfícies desenvolvíveis de reversas. Mais que isso, as curvaturas gaussianas trabalham com propriedades locais, assim podemos avaliar a curvatura em cada um dos pontos de uma superfície; se formos pensar em formas livres, como a fachada do edifício da figura 16, podemos até pensar em uma superfície que tenha trechos desenvolvíveis e trechos reversos, por isso as propriedades locais são importantes.

O programa *Rhinoceros* utiliza curvaturas gaussianas e exibe, em publicação do fabricante da ferramenta (RUTTEN, 2007), uma breve explicação das mesmas, a partir das quatro situações exibidas na figura 22, a seguir:

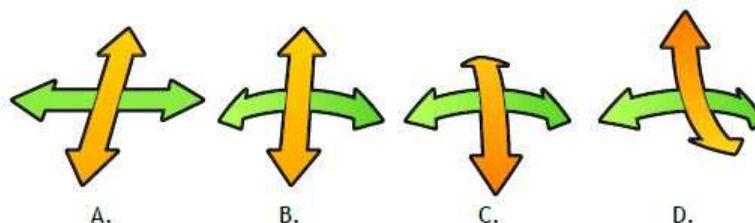


Figura 22: curvatura gaussiana
Fonte: Rutten, 2007, p.110

Em verde e amarelo observam-se as duas curvaturas principais em um determinado ponto da superfície, a cada uma dessas curvaturas atribui-se um valor, multiplicando-se estes dois valores, se o produto for zero, a superfície é plana ou planificável naquele ponto. No caso A ambas são iguais a zero, a superfície é localmente plana. No caso B uma curvatura é zero, a outra é diferente de zero, o produto dá zero, como nos pontos de uma superfície cilíndrica, que é desenvolvível. Nos casos seguintes já teríamos valores diferentes de zero, em C podemos ter ambas as curvaturas positivas com produto positivo, como numa superfície esférica (sinclástica); em D sinais diferentes de curvatura, produto negativo, como em um parabolóide hiperbólico (anticlástica).

Na figura 23, uma superfície é submetida à análise das curvaturas gaussianas na ferramenta *Rhinoceros 5.0*, os pontos mais baixos da escala de cor, exibida à direita da imagem, mais próximos do azul escuro, mostram os pontos com curvatura gaussiana menor, mais próximos a serem planificáveis, já os em vermelho os com valores de curvatura maiores. A superfície é toda reversa, todos os seus pontos se encaixariam no caso C da figura 22.

Observamos que o conceito de curvatura gaussiana vai além de classificar toda a superfície como plana ou reversa, a avalia localmente, em cada um de seus pontos. A operação de análise, via ferramenta *Rhinoceros*, é muito rápida, basta selecionar a superfície e dar um clique no *mouse* que a análise é feita. Pode-se também calibrar alguns parâmetros para a análise, como podemos ver nas caixas de comando à direita e abaixo da imagem da superfície na figura 23.

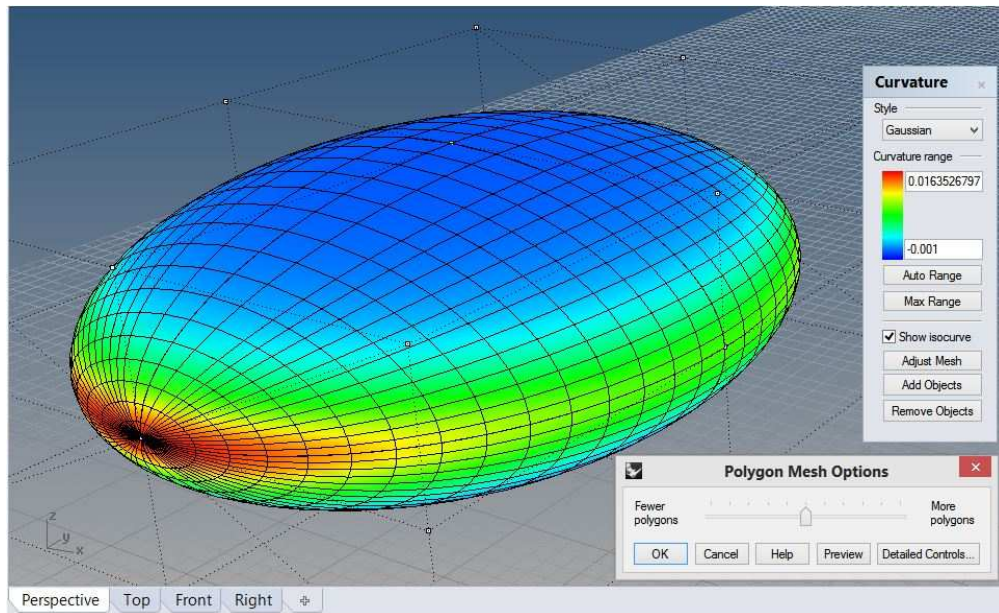


Figura 23: diagnóstico de curvatura gaussiana – Rhinoceros 5.0

Fonte: o autor, 2016

Mesmo as superfícies reversas podem ser construídas, como a que vemos à esquerda da figura 24. Algumas razões construtivas podem nos levar a transformar o jarro de flores, à esquerda, em duas formas semelhantes à direita, por um processo denominado discretização. *Discretizar*, em matemática, pode ser definido como a transformação de uma unidade contínua em unidades individuais. A curva c , em vermelho, do jarro da esquerda, pode ser transformada na linha poligonal d de cinco lados, no jarro do centro temos então a discretização da curva c onde a curva contínua foi transformada em unidades individuais e a própria superfície foi também discretizada. No vaso da direita observamos outra discretização da mesma superfície.

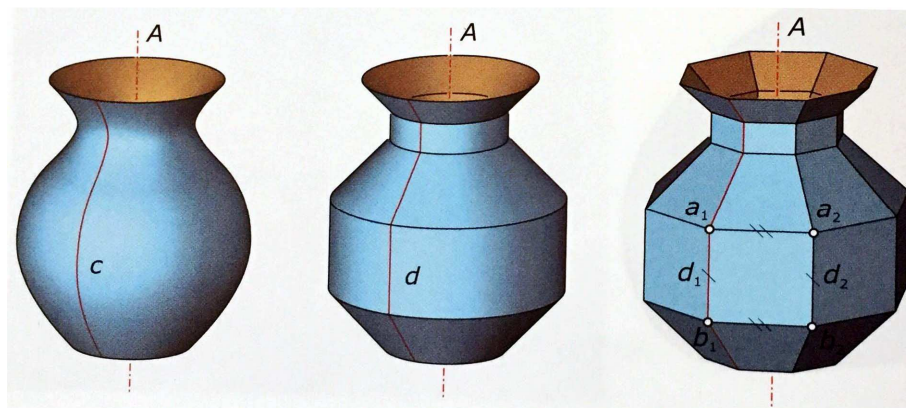


Figura 24: discretização de curva e superfície

Fonte: Pottmann et al., 2007, p.292

Os próprios materiais de construção podem direcionar esse procedimento, um jarro construído com peças planas de vidro levaria à solução da direita, o confeccionado com folhas metálicas curváveis poderia adotar a solução central, um jarro em barro poderia adotar a solução da esquerda. Um olhar geométrico veria planos à direita em solução poliédrica, um conjunto de superfícies desenvolvíveis ao centro (cônicas e cilíndricas) e uma superfície de revolução reversa à esquerda.

A uma discretização, pode se seguir uma *otimização*, podendo essa última vir também desacompanhada da primeira. Na figura 25 vemos uma cobertura em forma livre, que foi *discretizada* em uma malha de triângulos, posteriormente *otimizada*, como se vê à direita.

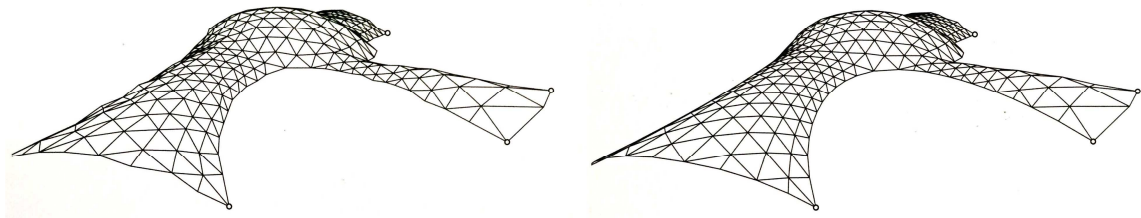


Figura 25: malha inicial e malha otimizada

Fonte: Pottmann et al., 2007, p. 663

Esta otimização pode buscar melhor eficiência geométrica, estrutural, funcional ou matemática (Pottmann, 2007), segue outro exemplo, na figura 26:

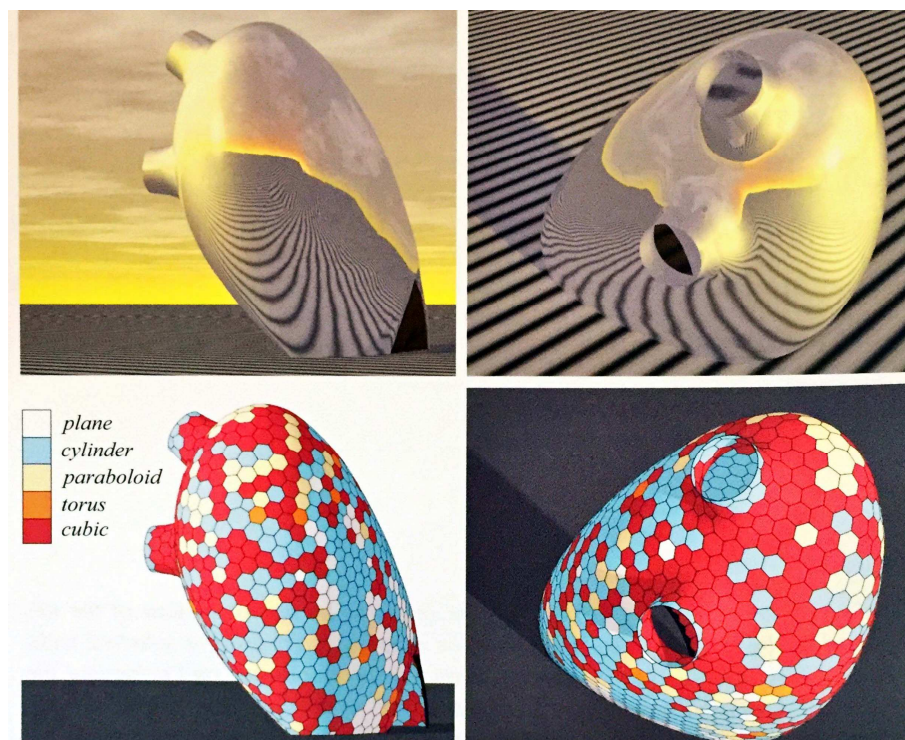


Figura 26: otimização da forma livre, conversão em trechos de superfícies diversas

Fonte: Eigensatz, 2010, p.50

A *panelização*, ou transformação em painéis, tem sido um procedimento recorrente de otimização, principalmente das formas livres. É um procedimento adotado como estratégia de construção para formas que são, em sua maioria, superfícies de dupla curvatura, com curvatura gaussiana diferente de zero, portanto reversas. Essa operação não se restringe a transformar o *grid*, ou malha, em painéis planos, na figura 26 houve a transformação em cinco tipos de superfície, como se observa na legenda à esquerda da figura. A primeira superfície é plana, a segunda cilíndrica, que é desenvolvível, já os três últimos tipos são superfícies distintas das demais e todas elas reversas.

A publicação de Eigensatz (2010), nos anis de um dos simpósios da AAG, *Advances in Architectural Geometry*, do mesmo ano, é um dos trabalhos que tem mostrado a preocupação em arquitetura e engenharia de dar conta das questões construtivas das formas livres, da sua *materialização*. O autor aponta o desenvolvimento de pesquisas em algoritmos que fazem este tipo de otimização por panelização, são soluções via algoritmos que automatizam essa otimização, oferecendo uma panelização que produz a solução mais próxima possível da forma livre idealmente modelada pelo arquiteto com ferramenta digital, estes algoritmos também levariam em conta a diversidade dos materiais construtivos.

Tratando de questões construtivas, também no seminário AAG, de 2012, temos o trabalho de Vaudeville (2012) que aponta estudos relativos à fabricação de painéis, neste caso em vidro. A figura 27 exhibe o esquema de uma máquina para produzir vidros com curvatura simples (superfície cilíndrica), já a figura 28 nos mostra uma moldagem que seria mais trabalhosa e difícil de ser automatizada, por se referir a um painel do mesmo material, só que de dupla curvatura.



Figuras 27 / 28: processos industriais de fabricação de painéis de vidro curvos

Fonte: Vaudeville, 2012, p.284 / p.283

As interações do material construtivo dos painéis com as estratégias de fabricação são importantes, se substituíssemos o material dos painéis, o vidro, por chapas metálicas flexíveis, poderíamos dispensar a utilização da máquina exibida na figura 27 e apenas flexionar as chapas, teríamos também que pensar em outra estratégia para fabricar as chapas metálicas de dupla curvatura, diversa da exibida na figura 28.

Nesses processos de fabricação nota-se, por vezes, que se pratica o que em inglês chama-se *file-to-factory*, em tradução literal: *arquivo para a fábrica*. Nesse procedimento os arquivos digitais, em projeto, são preparados para atuarem diretamente na etapa de fabricação, junto às máquinas de fabricação das peças. É recorrente que se faça a conversão de arquivos a outros formatos digitais, utilize-se algum *plugin*, ou mesmo outro *software* que seja compatível arquivos digitais que se correspondam.

Pupo (2009) diferencia *fabricação digital* de *prototipagem digital*, enquanto o primeiro caso se refere à construção do edifício, produzindo algo como as fôrmas ou as peças finais da edificação, tal como nos exemplos das figuras 27 e 28, o segundo caso se refere a maquetes ou a protótipos em escala 1:1.

Como exemplos de procedimentos de *fabricação digital* temos, além do já citado *file-to-factory*, o *metal bending*, ou dobras (ou curvas) no metal; para este último exemplo poderíamos imaginar a máquina da figura 27 a curvar uma chapa de metal. Outro caso são os procedimentos de *Computer Numeric Control* (CNC), ou Controle Numérico Computadorizado, ou, em tradução mais livre: Comando Numérico Computadorizado. Este último procedimento costuma ser utilizado para o controle de fresadoras. Quanto aos procedimentos de *prototipagem digital*, esses usam, em sua maioria, três princípios: o aditivo, o subtrativo e o corte; como exemplo, de cada um destes princípios: impressoras 3D, pequenas fresadoras e máquinas de corte a *laser*.

Há outras operações possíveis, dentre as que nos parecem ter sido estimuladas e facilitadas pelas ferramentas CAD, procuramos destacar as que notamos ser mais recorrentes na prática da arquitetura e urbanismo.

Ao finalizar este capítulo, chegamos a algumas conclusões parciais, que nos orientarão no prosseguimento da pesquisa nos capítulos seguintes. Uma delas é que, nos últimos anos, instala-se um quadro dinâmico de mudanças na área gráfica, como outrora havia se instalado na virada do século XVIII para o XIX, com o surgimento da geometria descritiva. Neste capítulo estabelecemos as relações dessas mudanças com a introdução de ferramentas CAD em arquitetura e urbanismo.

Dentre as relações que estabelecemos está a de que a *forma* e o *espaço* encontram, nas novas ferramentas gráficas, uma interface operacional que permite explorar alguns de seus aspectos até então pouco utilizados. Como exemplo, há a possibilidade de se trabalhar com propriedades locais da forma, ao definirmos a curvatura gaussiana em cada ponto de uma superfície, já possível pela matemática há algum tempo, que agora nos é oferecido pela ferramenta CAD em interface acessível e relativamente simples. Isso nos abre o campo da arquitetura e urbanismo para saberes geométricos que até então não lhe seriam usuais.

Operações sobre a forma, mesmo algumas já possíveis em ambiente analógico, como a parametrização, se disseminam no campo da arquitetura e urbanismo, principalmente após a introdução da interface da programação visual, mais amigável aos arquitetos que os *script* computacionais.

Conclusões parciais postas, nos interessaria agora, como próximo passo da pesquisa, reconhecer como a geometria descritiva pode estabelecer pontos de contato, ou um *diálogo*, com as ferramentas CAD, por exemplo, ao reconhecermos aplicações da descritiva em diferentes ferramentas digitais, mesmo que partam de interfaces não análogas à *épura*.

O reconhecimento dessas aplicações pode colaborar com a educação gráfica em arquitetura e urbanismo, ajudando a adequar o saber geométrico da descritiva às novas ferramentas. Para isso, interpretar a literatura não nos pareceu suficiente, consideramos necessário observar as operações sobre a forma, intermediadas por diversas ferramentas gráficas, idealmente em um ambiente controlado, onde possamos manejar algumas variáveis. Adotamos como estratégia de pesquisa a realização de um experimento, que terá a sua elaboração detalhada no capítulo seguinte.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo trata da elaboração do experimento, tomada como estratégia para prosseguimento da pesquisa, enquanto sua aplicação será relatada no capítulo três, seguida da articulação dos resultados obtidos no experimento com os objetivos da pesquisa.

A definição dessa estratégia teve como base uma bibliografia específica, apresentada em seguida, que contribui para algumas conclusões parciais exibidas ao final do capítulo anterior.

Especificamente quanto à geometria descritiva contribuíram Boyer e Merzbach (2012) para situá-la na história da matemática; Monge (1798,1820), assim como a tradução realizada por Souza (1812), nos exibiu a descritiva em seus anos de origem; Rodrigues (1964, 1968) e Pinheiro (1971, 1990, 1994) configuraram-se como referências à descritiva praticada no século XX no Brasil; Pastor (2015) e Gani (2014) nos mostraram uma descritiva praticada além da épura; Pérez-Gómez e Pelletier (2000) contribuíram com a nossa descrição da trajetória da descritiva da matemática à arquitetura e urbanismo, a fim de apoiar as operações sobre a forma, principalmente as de representação.

Quanto às ferramentas CAD, Terzidis (2006) nos mostrou princípios de uma arquitetura verdadeiramente computacional; Mitchell (2008) aspectos computacionais aplicados ao projeto, mesmo em meio analógico; Carpo (2011) trata dessas mesmas questões e adiciona uma perspectiva histórica a elas; Henriques (2013, 2015) nos expõe o deslocamento das questões de fundamentação matemática e geométrica em ambiente digital, do espaço euclidiano ao topológico, da geometria euclidiana à geometria associativa, das propriedades globais para as locais, quando da utilização de algumas ferramentas digitais contemporâneas; Pottmann et al. (2007) contribuiu com um grande repertório de operações sobre a forma, particularmente as realizadas em ambiente digital.

No que diz respeito ao experimento, consideramos aplicá-lo a um grupo de indivíduos, estudantes de arquitetura e urbanismo, com proficiência em geometria descritiva e ferramentas analógicas, não usuários de ferramentas CAD, que foram postos a executar operações sobre a forma com múltiplas ferramentas. Esses indivíduos foram expostos não só a ferramentas que lhe seriam novas, como fizeram

algumas operações que não lhes eram usuais, e, em ambiente controlado, foram observados pelo pesquisador. Propusemo-nos assim ir além de uma interpretação da literatura de pesquisas já realizadas, com a aplicação do experimento pudemos observar a geometria *em ação*, contextualizada às operações sobre a forma.

O objeto desta pesquisa é a geometria descritiva, com viés de embasar as operações sobre a forma arquitetônica e urbana, objetivamos que, com a aplicação do experimento, obtivéssemos dados que nos ajudassem a estabelecer relações entre fundamento geométrico, ferramentas gráficas (analógicas ou digitais) e operações sobre a forma, isso no contexto da educação gráfica em arquitetura e urbanismo; nesse contexto observamos a contribuição da descritiva. O melhor entendimento dessas relações nos ajuda a propor ações para adequar o diálogo da descritiva com as ferramentas CAD, que é objetivo da pesquisa.

Para a elaboração do experimento identificamos ser importante que ele se realizasse em condições onde as múltiplas ferramentas pudessem atuar. Assim buscamos, na primeira seção desse capítulo, algumas experiências contemporâneas de ensino e/ou pesquisa, onde isso ocorresse, e, além disso, a geometria estivesse presente e contextualizada a operações com a forma arquitetônica. Encontramos exemplos de diversos *workshop* onde essas características ocorriam, por isso acabamos por dar ênfase a esse formato de evento. Selecionamos exemplos que envolvem as etapas de gerar, manipular, representar e construir a forma, e que usam ferramentas e técnicas mistas: analógicas e digitais. Dos exemplos extraímos princípios que foram reproduzidos no experimento, princípios que estão devidamente identificamos ao fim da primeira seção desse capítulo.

Na segunda seção, elegemos as ferramentas que utilizamos no experimento, dentre as analógicas e digitais disponíveis e utilizadas em arquitetura e urbanismo, que atuam em processos bidimensionais ou tridimensionais, também definimos as interfaces operacionais dessas ferramentas.

Por fim, na terceira seção, montamos o experimento. Isto foi feito com a contribuição das duas seções precedentes. A montagem, ou formatação, levou em conta a adequação do experimento aos meios materiais disponíveis ao pesquisador, sem que se perdessem de vista os objetivos a serem alcançados pela pesquisa.

2.1 EXPERIÊNCIAS CONTEMPORÂNEAS

Experiências de ensino e pesquisa, que cumpram etapas desde a concepção até a construção, chegando algumas até à vivência da forma arquitetônica, têm se multiplicado nos últimos anos. O formato de *workshop*, as atividades intensivas e a montagem rápida de estruturas efêmeras, são outras características recorrentes nessas experiências, assim como o uso da modelagem digital e de técnicas mistas: analógicas e digitais.

Em nossa revisão de literatura, quando relatamos um panorama das pesquisas na área gráfica, encontramos diversos exemplos de *workshop* com essas características, seja como atividades que antecediam eventos como os de *Smartgeometry* (SG), *Advances of Architectural Geometry* (AAG), ou as *Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital* (SIGraDi), como de publicações nos anais desses eventos.

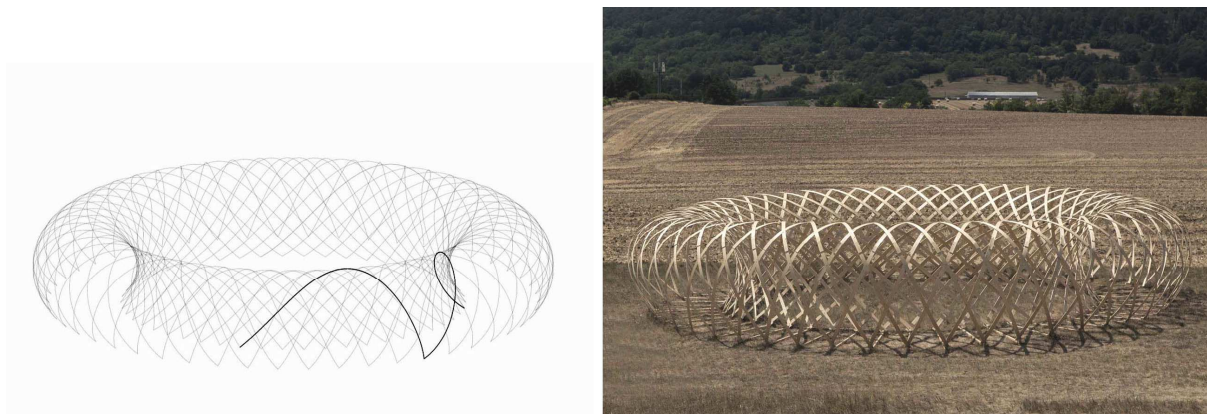
Dentre esses *workshop*, notamos um número expressivo dos que exploravam a forma livre. Nessa pesquisa investigamos as modificações nos processos de se operar a forma, assim como a relação desses processos com os fundamentos geométricos, mais do que buscarmos explorar a produção de formas livres. Em razão disso buscamos experiências que lidaram majoritariamente com as formas geométricas tradicionais.

Começamos com duas ações coordenadas por um grupo de pesquisa da *Universidade Politécnica da Catalunha* (UPC), o grupo *Computational Design Affairs* (CODA)¹³, cujas pesquisas exploram as características geométricas da forma e das estruturas de montagem rápida. Ambas as ações contaram com a participação de alunos de cursos de arquitetura e urbanismo, assim como seguiram as características deste tipo de evento já descritos no primeiro parágrafo desta página. Veremos que foram escolhidos dois exemplos, que utilizam uma mesma forma-base, o toro circular, isso se prestou para ilustrar as diversas possibilidades de se lidar com uma mesma forma geométrica, mesmo que não seja uma forma livre.

O toro a seguir foi montado na Hungria, por ocasião do Festival de *HelloWood*. Neste evento, anual e de verão, jovens arquitetos e designers empenham-se em encontrar soluções construtivas para estruturas em madeira.

¹³ sobre as atividades do grupo de pesquisa CODA ver: <http://coda-office.com/about>

A solução adotada, foi a de construir com ripas de madeira diversas peças, que curvadas correspondiam a curvas geodésicas¹⁴ no toro (ver destaque na figura 29). As peças de madeira assim flexionadas, eram fixadas nos pontos em que se entrelaçavam com as demais, por porcas e parafusos, isso resultou em uma estrutura rígida (ver figura 30). O aspecto geométrico e o estrutural foram considerados conjuntamente na definição desta solução.



Figuras 29 / 30: toro definido por curvas geodésicas

Fontes: <http://www.archdaily.com.br/br/01-146252/bigo-slash-coda> - foto: Donat Kékesi, 2013

Na figura 31 observamos a montagem das peças de madeira, na imagem podemos ver que se trata de um protótipo na escala 1:1, precedida pela fabricação e indicação da furação das peças nos locais devidos, para atender à montagem.

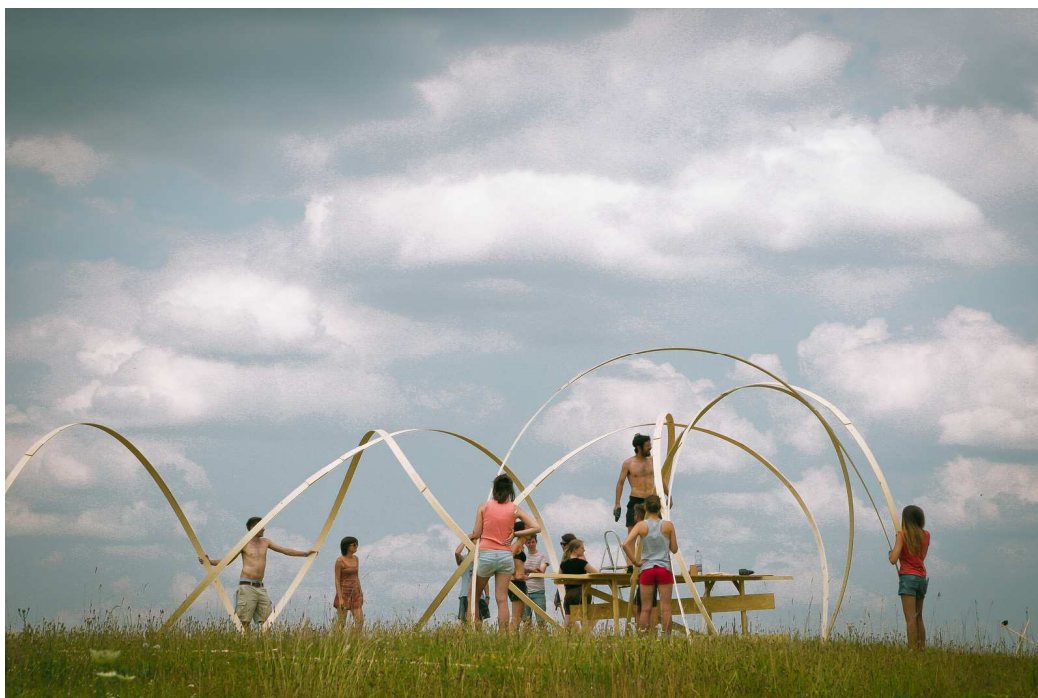


Figura 31: montagem do toro

Fonte: <http://www.archdaily.com.br/br/01-146252/bigo-slash-coda> - foto: Somoskoi Gabor, 2013

¹⁴ Curvas que definem a menor distância entre dois pontos em uma superfície.

O segundo exemplo (ver figura 32) também é do grupo CODA, que, contratado pela municipalidade de Barcelona, junto com alguns estudantes de arquitetura, montaram este semitório. O desafio foi elaborar uma estrutura que pudesse ser montada e desmontada em pouco tempo, dispondo de um orçamento limitado. Peças de madeira formavam estruturas que remetiam à curva geradora do toro, promovendo o que seria uma discretização dos arcos de circunferência, convertendo-os em arcos poligonais, que se comportavam na montagem e desmontagem como uma sanfona. Esta configuração permitiu que a estrutura fosse montada por apenas quatro pessoas e em menos de vinte minutos.



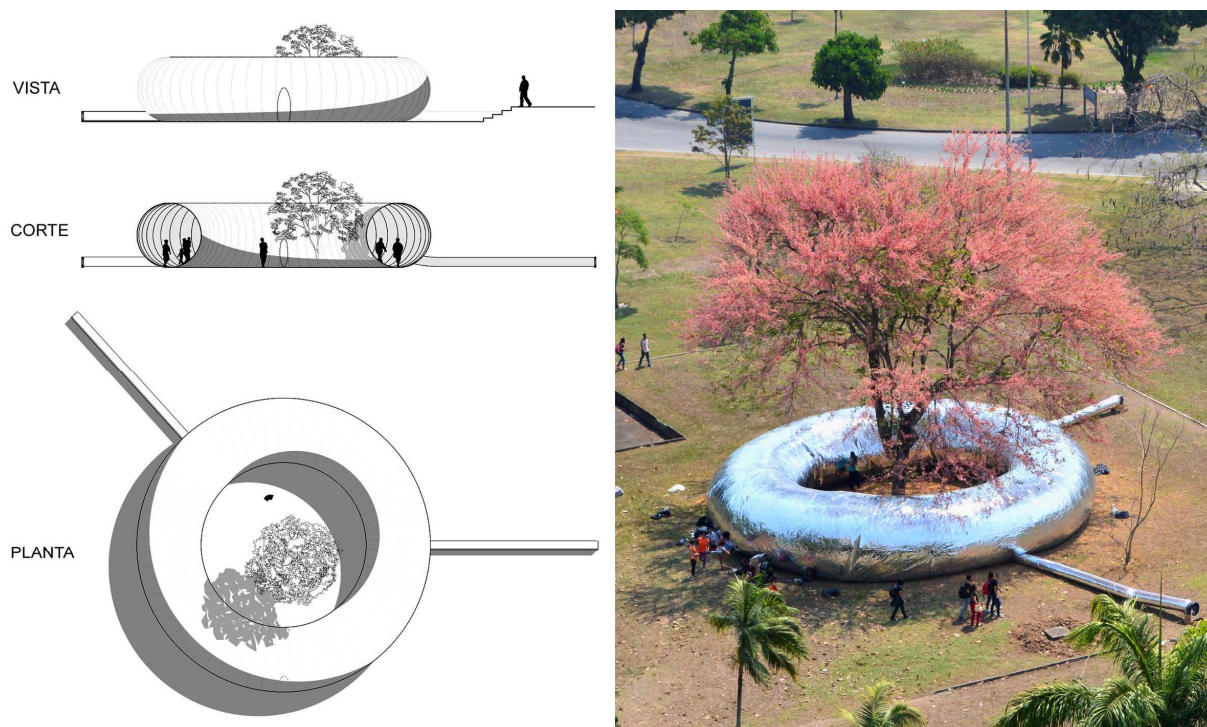
Figura 32: toro de montagem rápida, arcos discretizados
 Fonte: <http://andresflajszer.com> – foto: Andrés Flajszer, 2014

Agora destacaremos dois *workshop* promovidos na FAU-UFRJ, mais precisamente como atividade do grupo de pesquisa *a educação do olhar: apreensão dos atributos geométricos da forma dos lugares*, vinculado ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura (PROARQ). Ambos os eventos contaram com a participação de alunos e professores, da graduação e da pós-graduação das já referidas instituições, e configuraram-se como ambiente de ensino e pesquisa.

O primeiro *workshop*¹⁵, em 2014, teve como forma que orientou todos os trabalhos o toro circular, temos então uma terceira abordagem da mesma forma.

¹⁵ A respeito deste evento, ver (MARCONE; DIAS, 2015).

O evento, com duração de uma semana, percorreu fases análogas a de um projeto de arquitetura, seja promovendo a *concepção*, passando pela *representação* (figura 33), chegando até a *construção* da forma (figura 34), que resultou em um toro inflável de diâmetro externo de quatorze metros.



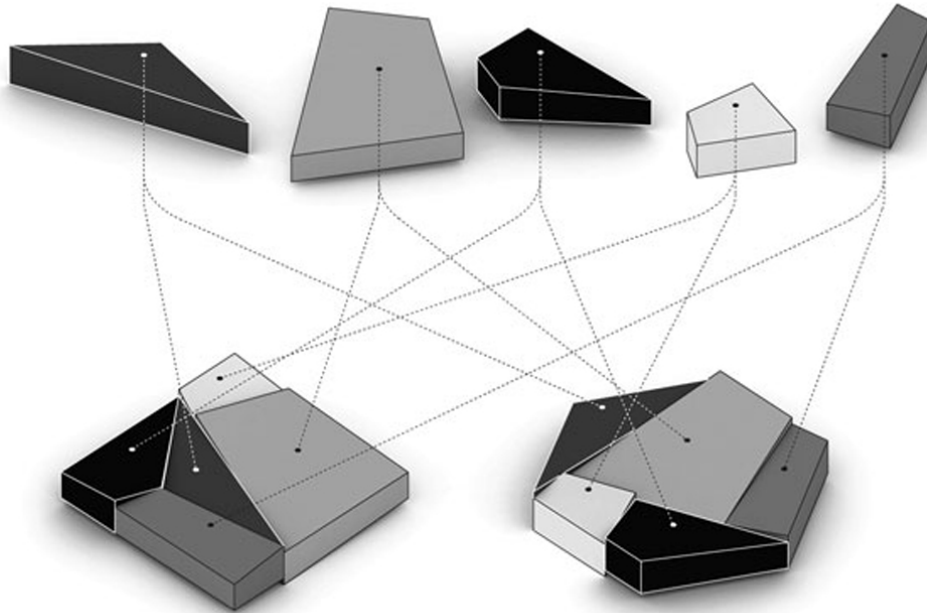
Figuras 33 / 34: toro representado / toro construído
Fontes: William O'Brien Jr., John David Todd e Eric Chen / o autor, 2014

A condução do *workshop* foi feita pelo professor William (Liam) O'Brien Jr., da Escola de Arquitetura e Planejamento do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT). Logo no início das atividades ele realizou uma palestra, onde expôs as diretrizes conceituais do evento, relacionando a presente experiência a outras de uma série denominada *Architectural Fictions*¹⁶, pesquisas nas quais utiliza as ferramentas computacionais para executar vários arranjos das formas tradicionais do repertório arquitetônico, questionando a frequente associação de formas livres à modelagem computacional, ou das formas tradicionais aos processos analógicos.

O Professor exemplificou que essas diretrizes poderiam chegar ao projeto de arquitetura, como em um estudo para duas residências (ver figura 35). As plantas quadrada e hexagonal das casas remetem a formas tradicionais e incorporam princípios contemporâneos como o de flexibilidade e adaptabilidade, um projeto que

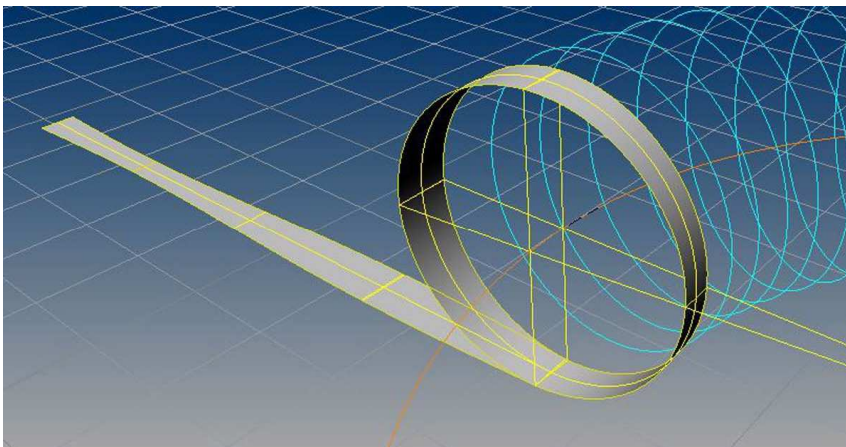
¹⁶ Para saber mais ver <https://afx2.wordpress.com/>

admite arranjo múltiplo entre as partes funcionais da residência (social, estar, íntimo, etc...), cada uma das partes relacionadas a um tom de cinza presente na figura.



Figuras 35: *twin houses* – projeto de William O'Brien Jr.
Fonte: William O'Brien Jr., 2014

Um dos princípios do evento foi, então, tratar uma forma tradicional, como o toro, por processos mais comumente associados às formas livres. Com a ferramenta CAD *Rhinoceros 5.0* gerou-se o toro por circunvolução, a circunferência azul percorre a laranja (ver figura 36), com o comando *squish* foi feita uma planificação, embora aproximada, de um pequeno trecho da superfície, visto que a superfície do toro é reversa.



Figuras 36 / 37: geração e planificação aproximada de anel do toro / corte de um dos anéis
Fontes: William O'Brien Jr., John David Todd e Eric Chen, 2014 / o autor, 2014

Na figura 37 observamos o corte de um anel (à direita) a partir de um molde (à esquerda). Com trinta e seis anéis, cada um correspondendo a dez graus, colou-se e inflou-se, as imprecisões da planificação aproximada se diluíram ao longo da superfície. Com o toro inflado, duas portas dão acesso ou ao espaço interno da superfície (figura 39), ou ao centro do toro (figura 38), onde se situa a uma árvore, precisamente no local que corresponde a seu eixo (figura 40), promovendo ambiências distintas.



Figuras 38 / 39 / 40: ambiências diversas e vivências

Fonte: o autor, 2014

Quanto às ferramentas CAD utilizadas ao longo do *workshop*, nas etapas de *conceber*, *representar* e *construir* a forma?

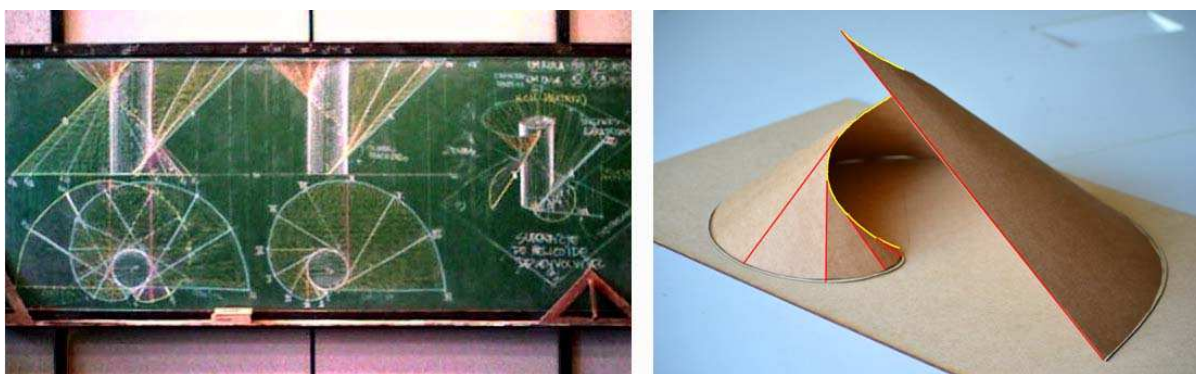
Gerou-se, termo geométrico, ou se *concebeu* o toro, por circunvolução, com a ferramenta CAD *Rhinoceros 5.0* (ver figura 36). Utilizou-se o mesmo conceito geométrico usual da geometria descrita a este fim, não obstante o *Rhino* ofereça outras maneiras de se gerar a superfície.

A *representação* gráfica da figura 33 teve origem na construção de um modelo digital 3D no *Rhino*. Deste modelo foram extraídas as três representações da referida figura, aplicando-se o comando *make2D*, ou *faça o 2D*, a ferramenta CAD simulou planta, corte e vista que seriam obtidas por projeções cilíndrico-ortogonais em arquitetura ou na geometria descritiva, por processos de construção de projeções conjugadas que explicariam e definiriam a forma ali representada. A seguir, sobre as três representações, utilizou-se um outro software: *Adobe Illustrator*, para se aplicar figura humana, vegetação e sombras aos desenhos bidimensionais.

Para se *construir* a forma final, optou-se por fazer uma *discretização* da superfície do toro, que é de dupla curvatura, portanto reversa, transformando-a em

trinta e seis anéis de superfícies cilíndricas, esses sim desenvolvíveis ou planificáveis (ver figuras 36 e 37). *Otimizou-se* a divisão do toro em muitas partes para que se aproximasse da forma geométrica ideal. Por fim, a planificação de um dos anéis exibida na figura 36, foi plotada em folhas de papel sulfite em escala 1:1. Com as folhas 1:1 foi elaborado um molde em PVC na cor branca (ver à esquerda da figura 37), a partir do molde foram cortados os anéis em cor metálica do toro (ver à direita da figura 37), a seguir foram colados com fita adesiva do mesmo material dos anéis, o *mylar*¹⁷. Observou-se a utilização de técnicas mistas, analógicas e digitais.

Um segundo *workshop*¹⁸, elaborado como atividade do mesmo grupo de pesquisa, teve como objeto geométrico de referência um *helicóide desenvolvível* (ver figuras 41 e 42), como o nome já indica: *planificável*, propriedade que já facilita a sua construção ao dispensar estratégias como a de discretização da superfície, adotada no exemplo anterior para fins de construção do toro.



Figuras 41 / 42: quadro negro com helicóide desenvolvível em épora / maquete física da superfície
Fontes: o autor, 2014

Essa superfície é tradicionalmente estudada em geometria descritiva, a partir da elaboração de épuras baseadas no sistema diédrico, com ferramentas analógicas, em um processo que já definimos como PI2D¹⁹, e isso permite que se *gere* e se *represente*, como se vê na figura 41 sobre uma interface plana, no caso um quadro negro. Podemos prosseguir com o processo PI2D e chegar à sua *construção* por planificação, por meios analógicos, como se fez para obter a maquete física da figura 42. Nessa maquete podemos observar a regra de geração desta superfície, gerada por retas, denominadas *geratrizes*, que se encontram na

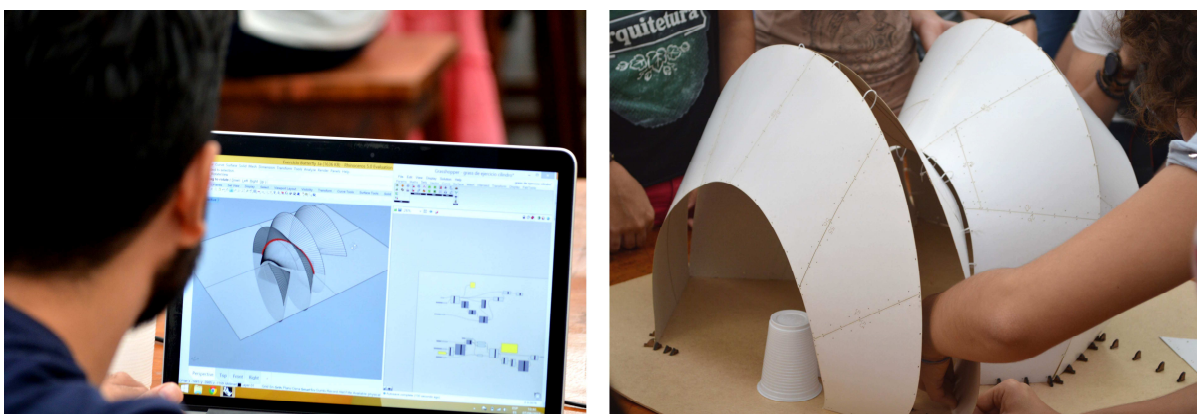
¹⁷ *Mylar* é marca registrada de uma película de poliéster, possui as propriedades de isolamento térmico e de resistência térmica.

¹⁸ A respeito deste evento, ver (MARTÍN-PASTOR, 2015).

¹⁹ Ver subseção 1.2.1.

cor vermelha, que são tangentes à curva amarela, que tem o nome de *hélice cilíndrica*. Esta curva, que com sua forma e posição no espaço acaba por determinar as direções de retas a ela tangentes, comporta-se como *diretriz* da superfície. Para melhor compreendermos a forma da curva, que se parece com uma mola, podemos imaginá-la enrolada em um cilindro, tal como se vê na figura 41.

Optou-se por utilizar a ferramenta CAD *Rhinoceros 5.0*, em processo que caracterizaremos como PC3D²⁰, para se *gerar* a forma geométrica (ver figura 43), na verdade seis helicoides desenvolvíveis, que interseccionam entre si e com o piso, formando um pavilhão, que foi denominado *Butterly Gallery*. Na figura 43 observamos o estudo do modelo digital, ainda em elaboração, na figura 44 a montagem da maquete física com a solução final do pavilhão. Esta maquete de estudo foi elaborada a partir do modelo digital, por *prototipagem rápida*, em máquina de corte a laser. Um olhar mais atento à figura percebe na maquete a marcação da divisão das placas de MDF, material a ser utilizado para a construção do pavilhão em 1:1, por *fabricação digital*, placas a serem cortadas em uma fresadora CNC.



Figuras 43 / 44: interseção das superfícies em modelo digital / montagem da maquete do pavilhão
Fonte: o autor, 2016

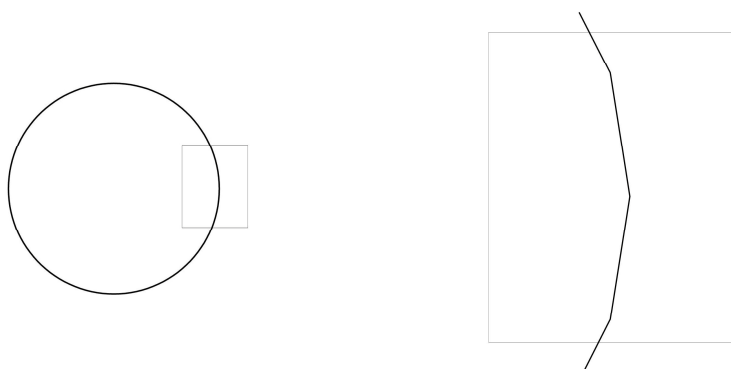
O *Rhinoceros* apresentou uma limitação ao gerar a superfície, ao aplicarmos as regras de geração tal como explicamos, nos referindo à figura 42, por tangentes à curva. Mesmo sendo fornecidas as instruções ao programa, correspondentes à geração geométrica da almejada superfície, ele produziu uma superfície aproximada à ideal, com pequenas imprecisões, mas que forma suficientes para inviabilizar a sua planificação. O próprio *software* identificou a superfície que acabara de gerar como reversa. O *software* não dispunha, ao menos na sua versão 5.0, onde não foram localizados nos menus oferecidos ao usuário,

²⁰ Ver subseção 1.2.1.

seja comando específico de se gerar a superfície, seja outro recurso alternativo de se chegar a ela; conseguiu-se um arremedo aproximado da mesma, o que, para os propósitos do *workshop*, onde seriam necessárias a precisão e a operação de planificação, não seria suficiente.

A saída encontrada foi utilizar, integrado ao *Rhino*, como vemos na janela à direita da figura 43, o *Grasshopper*. Uma ferramenta CAD de programação visual que dispõe, dentre seus recursos, alguns que permitem construir a superfície com exatidão; sem entrarmos em detalhes, optou-se por se avançar no estudo matemático da superfície, usar alguma trigonometria a aplicá-la, via *Grasshopper*, para se chegar à exatidão que se pretendia. Chamou-nos a atenção que, neste caso, a construção da superfície em modelagem digital, utilizou conceitos matemáticos diversos dos usuais em sua construção em *épura* com ferramentas analógicas, tais como os utilizados no quadro negro (ver figura 41); em *épura* foi possível se chegar ao fim do processo de construção sem o auxílio da trigonometria.

Destacamos a imprecisão que pode haver por trás de um comando de um *software* gráfico. Pedimos para gerar um helicóide desenvolvível e o software não fez *exatamente aquilo*, fez *quase aquilo*, e nem sempre nos damos conta. O exemplo da figura 45, é possível de ocorrer em algum *software*. Dá-se o comando de traçar uma curva, no caso uma circunferência, observamos na figura 46, ao se ampliar a região correspondente ao retângulo, que o software construiu um polígono de x lados, *discretizou* a curva.



Figuras 45 / 46: curva ideal / discretização da curva feita pela ferramenta CAD
Fonte: o autor, 2016

A situação revela o que pode se chamar de *caixa preta* do software, ocorre quando um procedimento intermediário numa sequência de operações fica

oculto ao usuário da ferramenta CAD, e, se esse não estiver atento, ou não possuir o conhecimento geométrico adequado para avaliar o resultado, pode ser levado a erro.

Quanto à montagem do pavilhão (ver figuras 47 a 50), as peças em MDF, cortadas e furadas em fabricação digital por fresadora CNC, foram inicialmente unidas por parafusos e porcas, formando cada uma das seis superfícies planificadas; posteriormente, cada uma foi erguida, fixada ao piso com o auxílio de peças de madeira e uma a outra por presilhas plásticas, estava pronto o pavilhão.



Figuras 47 / 48 / 49 / 50: montagem do pavilhão
Fonte: o autor, 2015

Nas figuras 51 a 53, temos o pavilhão montado, ao centro a foto da maquete com o pavilhão ao fundo.



Figuras 51 / 52 / 53: Pavilhão montado: fachada oeste / fachada oeste + maquete / fachada leste
Fonte: o autor, 2015

Durante as atividades do *workshop* não se produziram plantas baixas, vistas ou cortes, não se utilizou qualquer processo PI2D, seja para fins de estudo ou de representação da forma. O processo PC3D foi realizado por intermédio da ferramenta CAD *Rhinoceros 5.0* conjugada ao *Grasshopper*, que adicionou a programação visual. Estas duas ferramentas foram as únicas utilizadas em todos os trabalhos, não contamos aqui o *software* da cortadora a laser, utilizada na prototipagem rápida da maquete de estudo, nem o *software* da fresadora CNC, utilizada para cortar e furar as placas de MDF, em fabricação digital, das peças do pavilhão em 1:1.

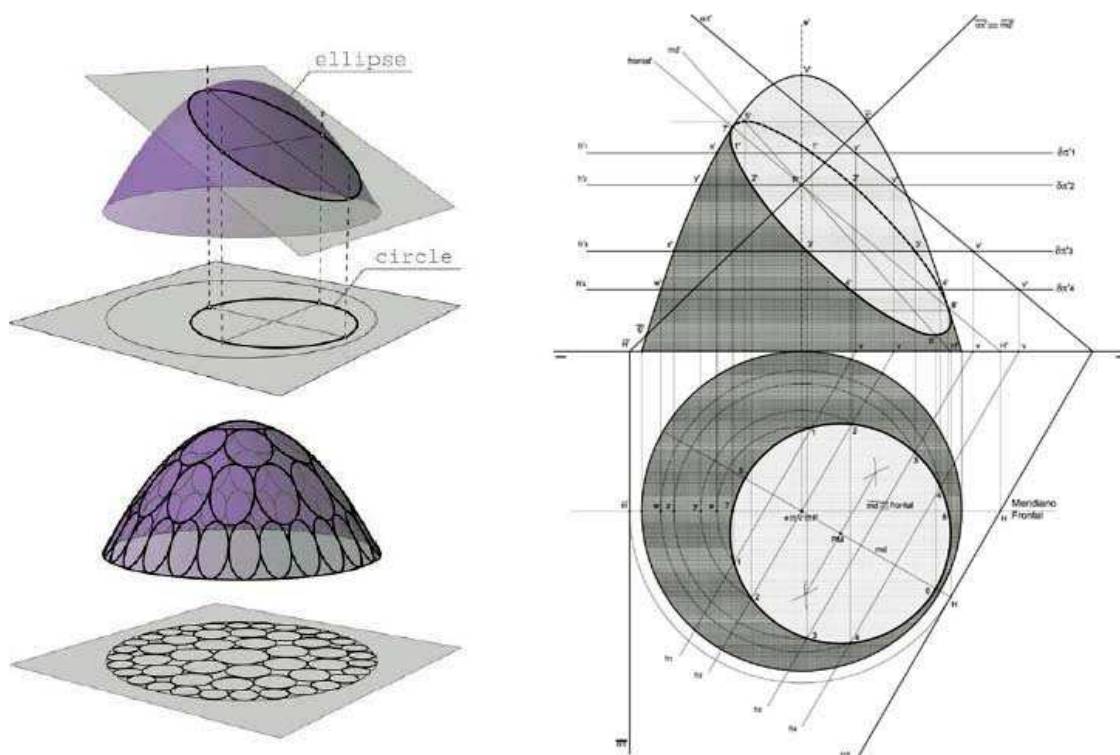
Andrés Martín-Pastor, pesquisador e professor de geometria descritiva da *Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación* (ETSIE), da Universidade de Sevilha, conduziu a maioria das atividades do evento, relativas às questões geométricas e utilização das ferramentas CAD, que levaram à solução final do pavilhão e às suas estratégias de montagem; intercambiou com pesquisadores, professores e alunos de graduação e pós-graduação da FAU-UFRJ, sua experiência em outros *workshop* que já havia realizado, com as mesmas características, dentre elas, este direcionamento geométrico.

Pastor descreve estas experiências em três de seus trabalhos, publicados nos XVIII SIGraDi (MARTÍN-PASTOR et al., 2014), no Simpósio da *Advances in Architectural Geometry* (AAG) de 2014 (NARVÁZ-RODRIGUEZ; MARTÍN-PASTOR; AGUILAR-ALEJANDRE, 2014) e na própria publicação que descreve o *workshop*, realizado na FAU-UFRJ, o qual acabamos de mostrar (MARTÍN-PASTOR, 2016). São trabalhos onde relata *workshop* desenvolvidos junto a universidades na Espanha, Colômbia, Argentina e Brasil. Martín-Pastor tem sido explícito em buscar nestas experiências o ensino da geometria descritiva sem se apoiar no sistema diédrico e na épura, explorando aspectos das ferramentas CAD como a modelagem 3D e os processos de prototipagem e fabricação digitais; em sua publicação de 2016 chega a tratar desta questão como uma mudança de paradigmas na área gráfica, induzida pelas novas ferramentas CAD.

Roberto Narváez-Rodríguez, pesquisador e professor de geometria descritiva, também da ETSIE da Universidade de Sevilha, tem desenvolvido pesquisas com esse mesmo direcionamento. Destacaremos aqui um de seus trabalhos desenvolvido conjuntamente com Jose Antonio Barrera-Vera, da mesma

Instituição (NARVÁEZ-RODRÍGUEZ; BARRERA-VERA, 2016), publicado no AAG de 2016. O trabalho relata um *workshop* que se propõe a trabalhar com superfícies geométricas clássicas, que proveriam aos alunos de graduação da ETSIE, conteúdos e competências que poderiam ser aplicadas posteriormente às formas complexas. Outro direcionamento que fica explícito é o de entender relações projetivas, não exclusivamente para fins exclusivos de representação, como se faria tradicionalmente no PI2D, ao se construir as projeções do objeto.

A forma clássica escolhida foi o parabolóide de revolução, gerado por uma parábola que gira ao redor de seu eixo. Seções planas, a produzir elipses, foram base para a discretização da superfície. Uma propriedade projetiva da superfície também foi explorada, com o eixo do parabolóide perpendicular a um plano de projeção, as seções que determinariam elipses se projetam, por projeção cilíndrico-ortogonal, segundo circunferências neste plano. Ver figuras 54 e 55:



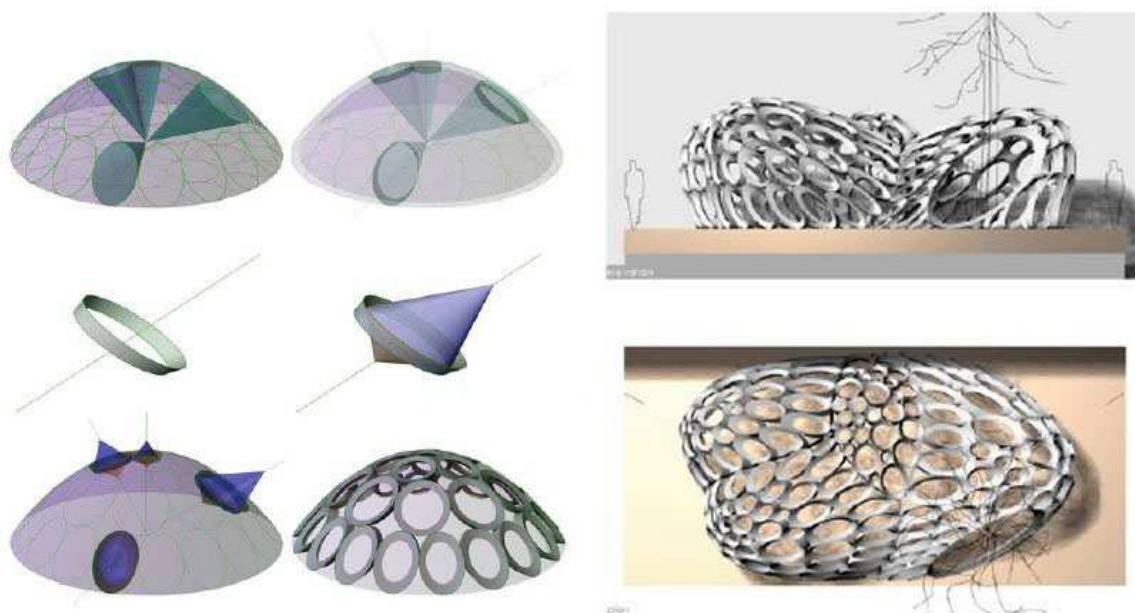
Figuras 54 / 55: propriedade projetiva da seção elíptica no parabolóide / demonstração em épora
Fontes: NARVÁEZ-RODRÍGUEZ; BARRERA-VERA, 2016, p. 383 / FATORELLI, SILVA, MARCONE, 2014.

Essa propriedade projetiva foi descrita primeiro por Arquimedes²¹, por isso se deu ao pavilhão o nome de *Archimedean Pavilion*, ou Pavilhão de Archimedes. Propriedade e superfície são parte do repertório clássico de geometria descritiva. Na

²¹ Arquimedes de Siracusa- matemático, físico, engenheiro, inventor e astrônomo da Grécia Antiga (287-212 A.C.)

figura 55 observamos a propriedade em uma épora, material didático do ensino de graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAU-UFRJ, cabe aqui um parêntese, é uma épora elaborada com a ferramenta *AutoCAD 2013*, o que releva um processo PI2D com ferramenta digital.

Voltando ao pavilhão, a figura 56 mostra a formação de diversas superfícies cônicas, com os vértices no centro do domo, delas se seleciona um pequeno trecho, a seguir este trecho se combina com trechos de dois outros cones, que, juntos, formam cada um dos anéis, o que dá rigidez à forma dos mesmos. Na figura 57 temos planta e vista, projeções conjugadas tal como na épora, do pavilhão em sua forma final, que são quatro paraboloides de revolução integrados.



Figuras 56 / 57: anéis por interseção de superfícies cônicas / vista superior e frontal do pavilhão
Fonte: NARVÁEZ-RODRÍGUEZ; BARRERA-VERA, 2016, p. 305 / p.394

Os cones foram fabricados digitalmente, material plástico foi cortado e furado, anéis formados e unidos uns aos outros por peças de metal, por fim as figuras 58 e 59 exibem o pavilhão já em finalização.



Figuras 58 / 59: pavilhão em finalização
Fonte: NARVÁEZ-RODRÍGUEZ; BARRERA-VERA, 2016, p. 395

Para encerrar esta seção do capítulo, extrairemos, das experiências relatadas, princípios que utilizamos no experimento de pesquisa, relatado no capítulo três.

O primeiro princípio adotado foi o de utilizar operações sobre a forma baseadas em conceitos ou práticas geométricas, o foco está na geometria.

O segundo princípio é o da forma geométrica remeter à arquitetura. Compreendemos a forma como contida no *mundo projetual* de Mitchell (2008), que nos permite deslocar do *mundo real* o objeto, conceito já expresso na seção 1.2. Abordagem que nos permitiu praticar a redução/simplificação geométrica de um objeto arquitetônico, tratamos assim objeto geométrico ou arquitetônico de maneira indistinta, utilizando analogias.

O terceiro princípio é o da extensão do experimento, de tal maneira que possamos percorrer diversas etapas similares a de um projeto, desde a *concepção*, passando pela de *representação* e indo até a sua *construção*. O termo *concepção* nos parece mais adequado a arquitetura e urbanismo que os termos *gerar* e *manipular*, estes últimos mais reconhecíveis em geometria; mesma situação do termo *construir*, que em geometria pode se confundir com algum termo como *desenvolver* ou *planificar*.

O quarto princípio é o de admitir técnicas mistas, entre analógicas e digitais, característica presente tanto nas ferramentas de desenho como nas técnicas de construção/montagem.

O quinto princípio eleito foi o de utilizar formas clássicas ou tradicionais, que façam parte do repertório formal dos participantes do experimento, isso retira o foco da exploração de formas novas, mantendo a possibilidade de explorar formalmente as já conhecidas, o foco é primordialmente dirigido aos processos de se operar a forma. Quanto às operações a serem executadas e que formas seriam estas, definiremos na seção 2.3, quando formataremos o experimento.

2.2 AMBIENTES, PROCESSOS E FERRAMENTAS

Nesta seção definimos as ferramentas analógicas e digitais que utilizamos no experimento de pesquisa, que associadas aos processos PI2D e PC3D definiram os ambientes de se operar a forma. Ao compormos os ambientes procuramos fazer com que eles tivessem a amplitude suficiente para comportar toda a sorte de operações com a forma que já destacamos no capítulo um, sejam as operações já clássicas da descritiva, sejam as que se propiciam pelo uso de ferramentas CAD.

Adotamos, no experimento, ferramentas utilizadas em arquitetura e urbanismo, mesmo que não tivessem uso exclusivo nesse campo, por isso descartamos *software* específicos ao ensino de geometria descritiva, embora eles existam. Acreditamos que esse direcionamento na escolha das ferramentas nos ajude a situar as questões geométricas na educação gráfica em arquitetura e urbanismo, ao nos facilitar a criação de analogias das operações sobre a forma a situações de projeto arquitetônico e urbano. Ademais, os indivíduos que participaram do nosso experimento eram estudantes de arquitetura e urbanismo, com pouco conhecimento de ferramentas CAD, esperávamos que demonstrassem maior interesse em aderir ao experimento ao operar ferramentas de sua área de estudo, vamos então a investigar que ferramentas seriam possíveis de se utilizar.

Observemos, no quadro 1, a exibir algumas ferramentas CAD para uso comercial em arquitetura e urbanismo, levantadas por Kilkelly (2014):

2D:	2D / 3D:	BIM:
AutoCAD LT	AutoCAD	ArchiCAD
DraftSight	BricsCAD	ArchiCAD STAR(T)
LibreCAD	ICADMac	Bentley AECOsim
NanoCAD	Chief Architect	Digital Project
TurboCAD LTE	DataCAD	Revit
	ProArchitect	Revit LT
	ProgeCAD	Vectorworks Architect
	ProgeCAD Architecture	
	Softplan	
	TurboCAD Pro Platinum	

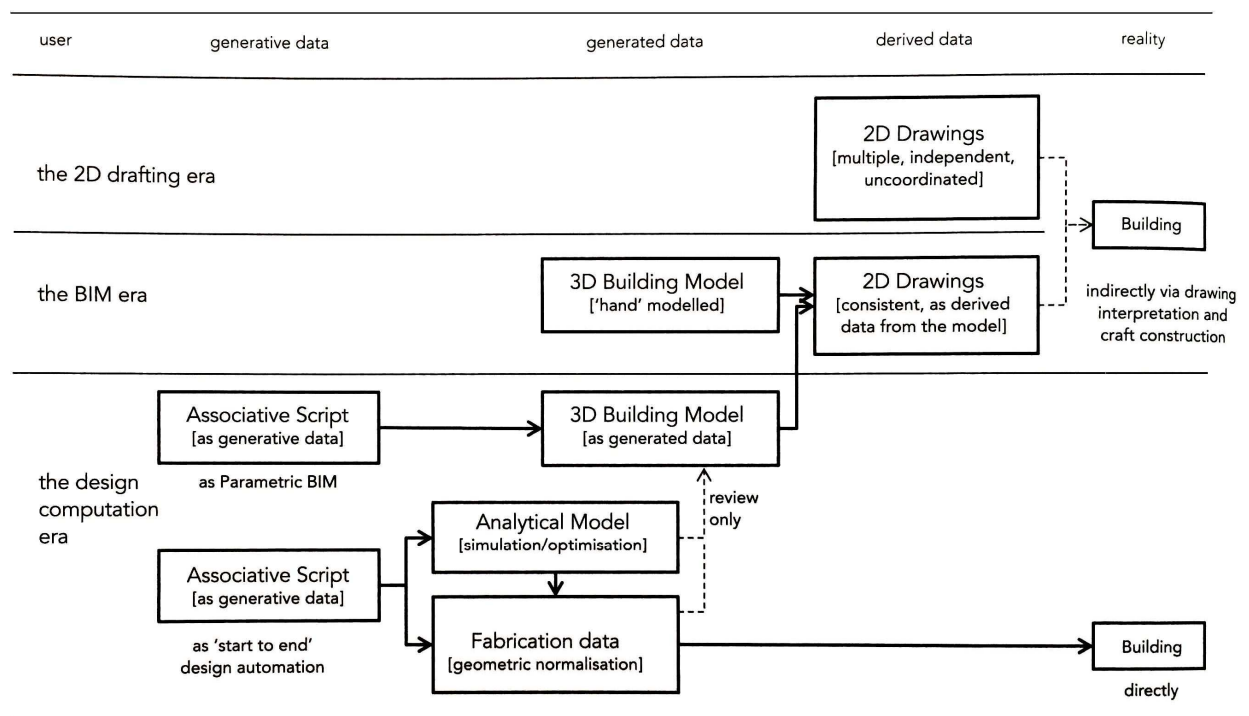
Quadro 1: algumas ferramentas CAD de uso comercial em arquitetura e urbanismo

Fonte: <<http://archsmarter.com/which-architectural-software/>>. Acesso em: 27 maio 2015.

O autor classificou as ferramentas comerciais mais utilizadas em escritórios de arquitetura norte-americanos em 2014, por produzirem desenhos 2D,

2D e modelagem 3D, ou serem de plataforma BIM. Isso nos revela a multiplicidade de ferramentas a se fazer do mesmo, além de três abordagens diversas de se operar a forma. Em educação gráfica, em arquitetura e urbanismo, isso pode nos apontar um caminho em ensino de não nos fixarmos a uma única ferramenta, que seja aberto a trabalhar com a variedade de processos (2D, 2D/3D, BIM). Não estão listados aí *software* utilizados para simulação e otimização, seja: térmica, acústica ou estrutural. Notamos também a omissão do *Rhinoceros*, que produz modelos 3D que podem ser exportados para alguns desses *software*, e podem ser incorporados a algumas dessas plataformas BIM. Há a omissão da *programação visual*, presente no uso conjugado do *Grasshopper + Rhinoceros*, ou de *software* como o *Generative Components* (GC), da fabricante *Bentley*, muito utilizado nos primeiros trabalhos em *Smartgeometry* na década passada, antes do surgimento do *Grasshopper*.

Já o artigo de Robert Aish (2013), um dos primeiros membros do *Smartgeometry*, intitulado *First build your tools*, ou *Primeiro construa suas ferramentas*, considera a dinâmica de introdução das ferramentas gráficas em arquitetura e urbanismo, ele nos oferece um quadro síntese que optamos por reproduzi-lo aqui, sem tradução (ver quadro 2):



Quadro 2: três eras das ferramentas CAD

Fonte: Aish, 2013, p.40

Aish nos propõe, no quadro, um sumário da prática das ferramentas CAD em três eras: a era dos desenhos 2D, a era do *Building Information Modeling* (BIM) e a era do *Design* Computacional. Admite superposições temporais destas práticas. Convém lembrar que, atualmente, praticam todas elas, não nos surpreenderia até que encontremos, mesmo que em número cada vez menor, arquitetos que não usem qualquer ferramenta CAD.

A era 2D teria se iniciado na década de 1980, com a transposição para as ferramentas CAD, de práticas de desenho análogas ao digital, o que se deu com a construção gráfica de desenhos bidimensionais análogos às projeções cilíndrico-ortogonais da geometria descritiva, como plantas baixas, cortes e vistas; uma prática onde as ferramentas CAD 2D se comportariam como editores de desenho (RÊGO, 2001). Os múltiplos desenhos eram ainda independentes e não integrados, tanto por serem desenvolvidos por profissionais diferentes, responsáveis por áreas diversas de projeto (arquitetura, estrutura, hidráulica, elétrica), como por não serem subproduto de algum modelo digital 3D.

Os primeiros *software* de modelagem 3D não teriam aberto uma nova era na área gráfica em arquitetura e urbanismo, como exemplo temos o seu uso inicial, por alguns arquitetos, limitado à obtenção de perspectivas para fins de compreensão/apresentação de um projeto. A partir da disseminação das ferramentas BIM mudanças maiores acontecem, como se elaborar um modelo virtual 3D e dele se extraírem desenhos 2D como subprodutos, podendo mesmo manter nestes subprodutos a codificação para a representação da forma originalmente confeccionada em interface 2D. As ferramentas BIM incorporaram as características de serem editores de desenho, como as ferramentas 2D, mas foram além de simples modeladores 3D, ao trabalharem com a tecnologia voltada para objetos, ao “*permitir a transformação de entidades geométricas em objetos ou elementos construtivos*” (RÊGO, 2011, p. 88).

Nos *software* BIM, há a construção tridimensional virtual do próprio objeto arquitetônico, ou de suas partes como esquadrias e paredes. O objeto digitalmente construído carrega informações, além das dimensionais, outras como as do material com o qual será construído e seu custo, ou as propriedades acústicas e térmicas dos mesmos. Informações como cor e material construtivo, que seriam incluídas em um modelo elaborado em softwares 3D para fins exclusivos de visualização,

adquirem nova importância por poderem ser convertidas em dados qualitativos ou quantitativos. Exemplo disso é que os materiais, relacionados ao objeto construído virtualmente pelo software BIM, podem ser quantificados e transpostos para tabelas de orçamento de obra, alterações neste objeto implicariam em alterações automáticas nos quantitativos e no orçamento.

Os softwares BIM também oferecem a possibilidade de se produzir plantas, cortes, vistas e perspectivas, a partir do objeto tridimensional modelado virtualmente. Alterações no modelo implicam em alterações automáticas em todas as representações expressas como desenho. Mais do que programas, podemos falar em plataforma BIM, que admite o intercâmbio de arquivo entre diversos *software*, como os voltados a projetos complementares ao de arquitetura.

Aish (2013) faz uma crítica à pouca contribuição que os *software* BIM trouxeram para a modelagem e a concepção da forma arquitetônica, identificando a plataforma BIM muito mais direcionada a produzir um ambiente de projeto que entregue soluções integradas, seja para gerir o próprio projeto ou a construção do edifício. Por esse mesmo motivo não consideramos relevante utilizar alguma ferramenta BIM no experimento de pesquisa, optamos pela utilização de uma ferramenta de modelagem digital 3D.

Ao que Aish define como a terceira era, temos a era do *Design Computacional*, que se for traduzido para *Desenho Computacional*, ou *Projeto Computacional*, poderia causar algum ruído, ficaremos com o termo *Design*. Sobre esse *Design Computacional* já tratamos anteriormente na seção 1.3, citamos Terzidis (2006) e a característica de se gerar a forma por algoritmos, seja via *script* ou por *programação visual*, quanto a esta última a exemplificamos com o uso conjugado dos *software* *Rhinoceros* e *Grasshopper*; outra ferramenta CAD possível de gerar formas dessa maneira seria o *Generative Components* (GC). O que Aish destaca no seu artigo, que ilustra com o quadro 2, é que esse design paramétrico pode ser integrado às ferramentas BIM; ou então percorrer um caminho paralelo, dispensar a integração à plataforma BIM e já dirigir o processo de projeto à *fabricação digital*, construindo partes do edifício, algo que já descrevemos aqui na seção 1.4.

Elegemos, para o experimento, quatro ferramentas gráficas²², as três últimas delas são ferramentas CAD:

- *Sistema Diédrico*²³;
- *AutoCAD 2016*;
- *Rhinoceros 5.0*;
- *Grasshopper 1.0*.

Com as quatro ferramentas gráficas compusemos, em diferentes combinações com os processos definidos na subseção 1.2.1, a saber: PI2D e PC3D, os quatro ambientes do experimento, onde realizamos operações sobre a forma, seja para concebê-la, representá-la ou construí-la, ambientes que denominamos de:

- Analógico + PI2D;
- Digital + PI2D;
- Digital + PC3D;
- Digital + PC3D + Programação Visual.

Para cada um desses quatro ambientes criamos uma subseção de capítulo, onde os apresentamos, a seguir.

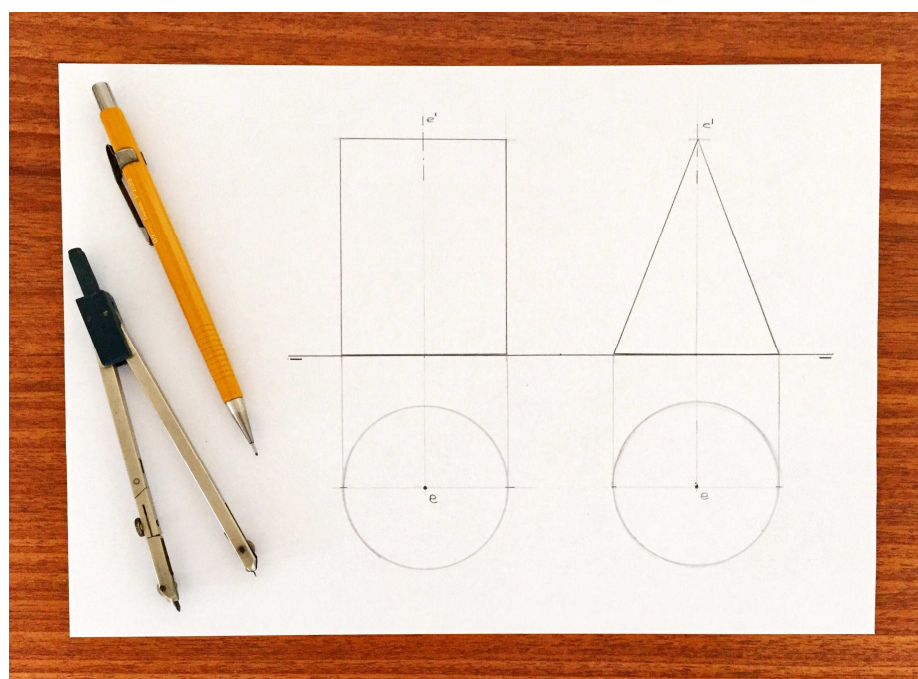
²² Sobre os critérios de eleição das ferramentas CAD para o experimento, consulte a página 85.

²³ Sobre o sistema diédrico e a subsequente formação da épura, ver a figura 2, página 24.

2.2.1 Analógico + PI2D

O primeiro ambiente definido para operarmos a forma será o que nomeamos de *Analógico + PI2D*, ou **Ambiente 1**, ambiente já usual aos indivíduos de nosso experimento, corresponde às operações em meio analógico e em *épura*, é um *processo intermediado por representações bidimensionais conjugadas* (PI2D).

A figura 60 nos mostra um cilindro e um cone neste ambiente, que tem como ferramenta gráfica o sistema diédrico, este foi utilizado via interface consagrada da geometria descritiva: a *épura*²⁴. A mídia utilizada na figura 60 foi a folha de papel sulfite A4, convém distinguir *mídia* de *interface*, podemos, por exemplo, construir a interface da *épura* em outra mídia, como o quadro negro.



Figuras 60: ambiente Analógico + PI2D

Fonte: o autor, 2016

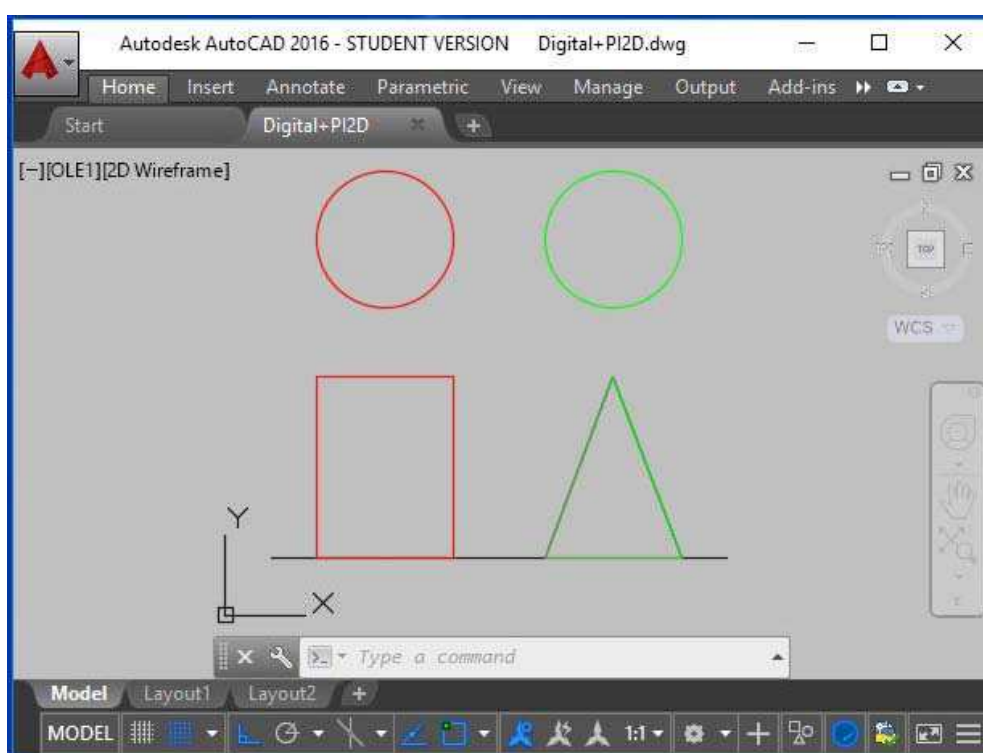
Consideramos o sistema diédrico como uma ferramenta, que conta com a interface plana da *épura* a nos permitir operar a forma. Não devemos confundir esta ferramenta com o instrumental utilizado, na figura 60 observamos lapiseira e compasso como exemplos de ferramental.

Optamos por confeccionar a *épura* em meio analógico, embora fosse possível utilizar ferramentas digitais, vide figura 55, onde temos uma *épura* construída com o *software* AutoCAD.

²⁴ Para relembrar do sistema diédrico com a subsequente formação da *épura*: ver figura 2, página 24.

2.2.2 Digital + PI2D

No **Ambiente 2** utilizamos uma ferramenta CAD, o *AutoCAD 2016*, logo as operações sobre a forma ocorreram em meio digital. Apesar do *software* utilizado neste ambiente permitir a construção de modelos 3D, optamos por elaborar apenas desenhos bidimensionais, que foram construídos sobre a interface plana que o software nos oferece, caracterizada por um plano, com coordenadas de referencial cartesiano (x, y). A interface plana é exibida na mídia, que é a tela do computador (ver figura 61). Na figura temos os mesmos cilindro e cone do exemplo anterior, dos quais se construiu, de maneira conjugada, uma vista superior e de frente, logo PI2D.



Figuras 61: ambiente Digital + PI2D

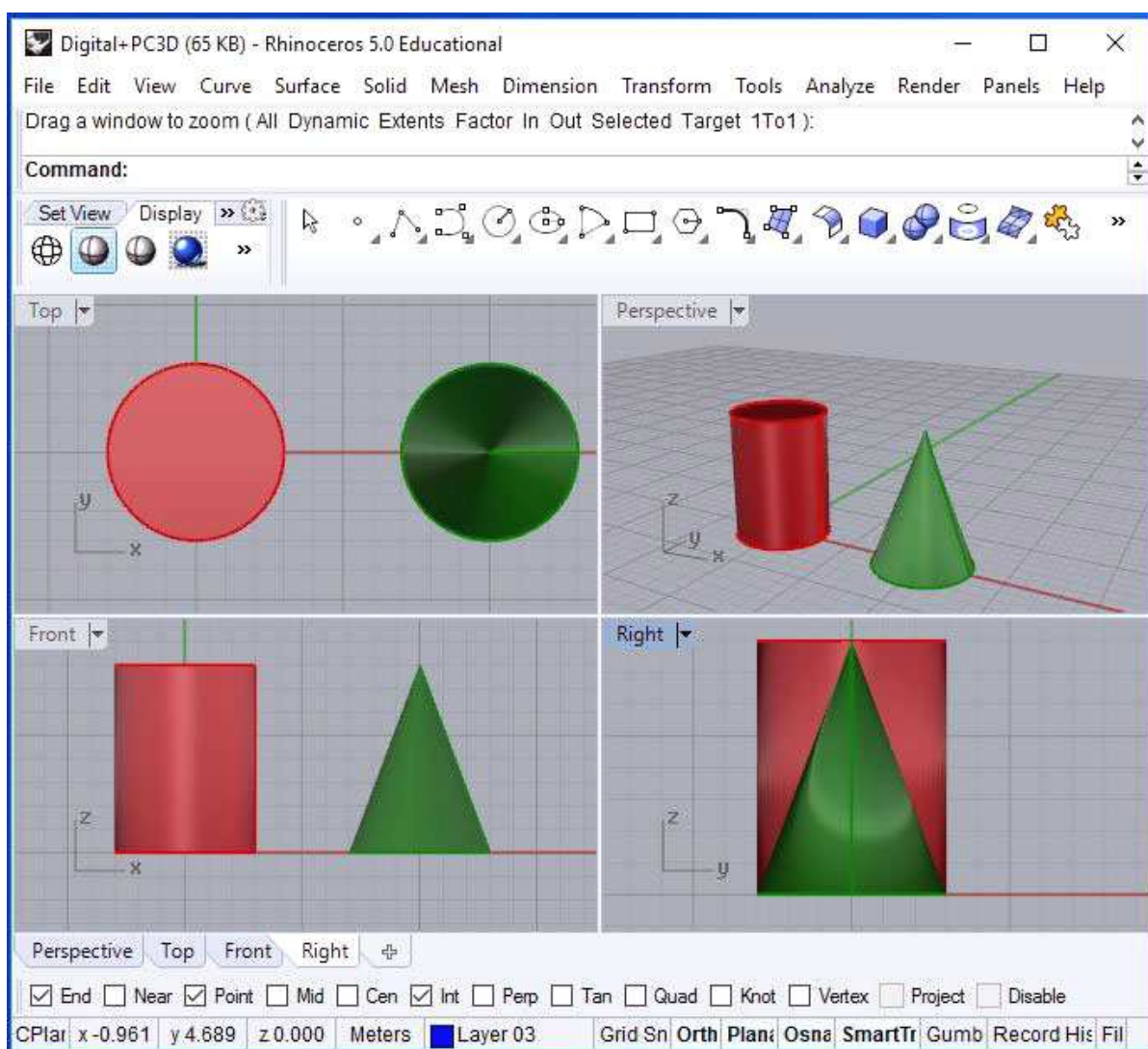
Fonte: o autor, 2016

Podemos tratar como vistas e não como projeções, mais como arquitetura e menos como geometria descritiva. A linha de terra da descritiva cede lugar a uma linha que se compreende como o chão, constrói-se a vista superior na parte de cima do desenho, invertendo a posição usual com a vista frontal, se compararmos ao que se pratica de maneira mais recorrente em geometria descritiva, ao situarmos os objetos majoritariamente no primeiro diedro. As analogias com a *épura* são evidentes, mas temos antes vistas que projeções, vistas estas das quais também retiraremos a codificação de um desenho técnico de arquitetura, simplificando-as e nos preocupando unicamente o processo gráfico de produzi-las nesse ambiente.

2.2.3 Digital + PC3D

No **Ambiente 3**, os mesmos cilindro e cone, com a ferramenta digital escolhida, o *Rhinoceros 5.0*, são modelados em 3D digitalmente, em um *processo de construção tridimensional de um objeto virtual*, ou PC3D. Aqui não se constroem vistas ou projeções, constrói-se o objeto.

Há como se personalizar uma interface com diversas janelas (ver figura 62), que são pontos de vista não conjugados, que podem expressar até *zoom* diversos. Pontos de vista que equivalem ao observador situado no infinito, ou a uma média distância como na perspectiva cônica, exibida na parte superior direita da figura. Qualquer alteração na forma se manifesta em todas as janelas simultaneamente. O referencial cartesiano (x, y, z) está presente e a mídia é a tela do computador.

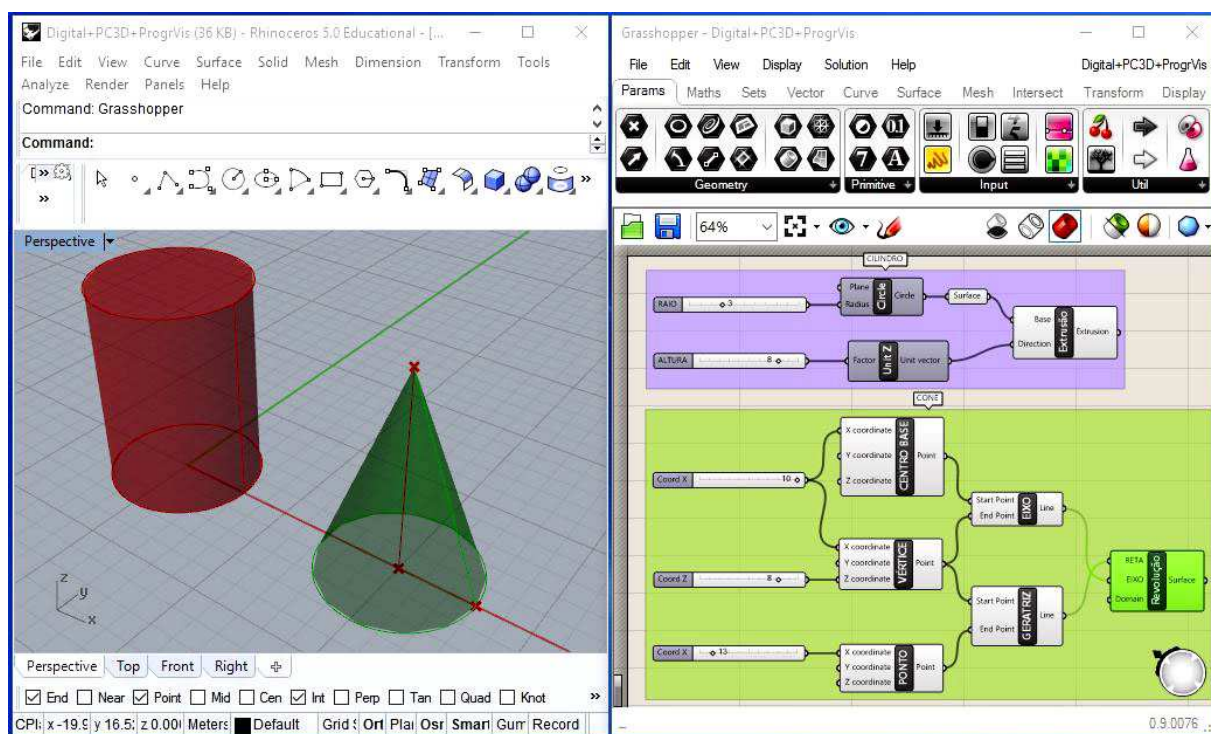


Figuras 62: ambiente Digital + PC3D

Fonte: o autor, 2016

2.2.4 Digital + PC3D + Programação Visual

No **Ambiente 4**, temos a modelagem digital integrada à programação visual, pelo uso conjugado do *Rhino* 5.0 com o *Grasshopper* 1.0. No primeiro *software* dá-se o comando “*Grasshopper*”, abrindo uma janela do segundo, que funciona integrado ao primeiro, na mesma mídia: tela do computador (ver figura 63).



Figuras 63: ambiente Digital + PC3D + Programação Visual

Fonte: o autor, 2016

Com a interface customizável, abrimos uma só janela no *Rhino*, que nos mostra uma perspectiva, à direita posicionamos uma janela do *Grasshopper* de igual tamanho; nesta última notamos um retângulo ao centro, na cor lilás, que expressa a elaboração de um algoritmo que ordena a construção de um cilindro no *Rhino*, à esquerda; a mesma coisa acontece com o cone, só que com as *ordens* partindo do retângulo maior, na cor verde.

Sem detalhar os dois algoritmos, temos aí dois exemplos de *Programação Visual*²⁵, o *Rhino* comporta-se como local da realização da modelagem digital de ordens dadas via algoritmos, partindo de outro programa. A Programação Visual se constitui como interface operacional mais amigável a arquitetos que a elaboração de *script* computacionais.

²⁵ Para *Programação Visual*, rever a figura 12, página 41.

Lembramos que o *Rhinoceros* também permite programação por *script*²⁶, assim como de que é possível, no ambiente 4, se combinar formas modeladas exclusivamente no *Rhinoceros* com outras advindas do *Grasshopper*.

A escolha dos *software* se orientou, primordialmente, por apresentarem características adequadas a compor os ambientes do experimento, sendo ideais aos processo 2D, 3D ou de Programação Visual. Fatores secundários nos orientaram na escolha, como a difusão dos programas em arquitetura, o que aumentaria o interesse dos participantes do experimento em aprendê-los. O fato do *Grasshopper 1.0* ser gratuito, o *AutoCAD 2016* oferecer versão gratuita para estudantes e o *Rhinoceros 5.0* também, mesmo que esse último o faça somente por 90 dias, foram também considerados na seleção. A utilização do *Rhinoceros* na composição de dois dos ambientes e os recursos geométricos que oferece, como a variedade de possibilidades de geração de superfícies, só para citar um deles, também foram relevantes para a sua escolha, mesmo que não seja um *software* voltado especificamente à arquitetura.

Elaboramos um quadro síntese dessa seção de capítulo, o quadro 3, com os quatro processos utilizados no experimento de pesquisa, que cobrem a maioria das operações sobre a forma tratadas na tese. Em cada ambiente são definidas as respectivas ferramentas e seus tipos, entre analógica e digitais, assim como os processos e as respectivas interfaces. Destacamos que, nos quatro ambientes, podemos chegar a um mesmo objeto, mesmo que por caminhos diversos.

Nº	Nome do ambiente	Tipo de ferramenta	Processos	Ferramentas gráficas	Interface	Produto
1	Analógico + PI2D	Analógica	PI2D	Sistema diédrico	Épura	Objeto
2	Digital + PI2D	Digital	PI2D	AutoCAD 2016	Vistas conjugadas	
3	Digital + PC3D	Digital	PC3D	Rhinoceros 5.0	Perspectiva (e/ou Vistas)	
4	Digital + PC3D + Programação Visual	Digitais	PC3D + Programação Visual	Rhinoceros 5.0 + Grasshopper	Perspectiva + Algoritmo	

Quadro 3: ambientes, processos, ferramentas e interfaces

Fonte: o autor, 2016

²⁶ Para *script*, rever a figura 11, página 40.

2.3 MONTAGEM DO EXPERIMENTO

Sobre a metodologia de toda esta investigação, utilizamos como principal referência o livro de Lakatos e Marconi (2005), para organizar os procedimentos de pesquisa; quanto à abordagem qualitativa, que utilizamos no experimento, recorreremos também a Minayo (1999, 2005).

Procuramos selecionar métodos e técnicas de pesquisa adequados aos meios materiais aos quais tivemos acesso, que nos ajudassem a atingir o objetivo geral da pesquisa: o de contribuir para adequar o ensino de geometria, em particular o da geometria descritiva, em escolas de arquitetura e urbanismo, às operações sobre a forma realizada com múltiplas ferramentas gráficas, sejam analógicas ou digitais, de interface 2D ou 3D. À alternância entre ferramentas, foi adicionada uma variável, que é a utilização de operações hoje emergentes e pouco associadas a geometria descritiva, como a *parametrização* e a *discretização*.

A realização de um experimento visou reproduzir, em condições controladas e observáveis, situações de operação da forma com múltiplas ferramentas, que se pudesse observar a utilização do conhecimento geométrico, em particular o de geometria descritiva, nesse contexto. Objetivou-se construir, com o experimento, um ambiente propício a se observar relações que pudessem se estabelecer entre *saber geométrico*, *ferramentas gráficas* e *operações sobre a forma*, a considerar o quadro atual onde estes três elementos parecem estar em modificação, na prática da arquitetura e urbanismo.

Buscamos extrair das experiências contemporâneas de *workshop* princípios a serem reproduzidos em nosso experimento, tal como já expusemos ao fim da seção 2.1. Apesar da aparente conveniência em se produzir um novo *workshop*, como ambiente ideal para se simular as condições de teste da pesquisa, não foi esse o formato adotado. A opção por *workshop* requereria a mobilização dos indivíduos por dias seguidos, exigiria a mobilização de maiores recursos financeiros que o formato escolhido. Nosso acesso ao ambiente de ensino, visto que o pesquisador que redige esta tese é docente do Curso de Graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAU-UFRJ, tornou viável a realização do experimento no formato de disciplina do referido curso de graduação, no primeiro semestre letivo do ano de 2016.

Formatamos o experimento de pesquisa à disciplina complementar (não obrigatória), já existente na FAU-UFRJ, de nome *Geometria Descritiva Aplicada à Arquitetura*, com ementa (ver Anexo A) flexível a ponto de poder comportar o experimento. A disciplina é composta de 60 horas-aula²⁷, divididas em 15 semanas, 4 horas-aula a cada semana, que foram ministradas juntas, em um único dia da semana, sempre às quartas-feiras. As aulas se deram em sala de aula regular, como mesas e quadro negro, em 80% do tempo; os outros 20% foram ministrados no Laboratório de Modelos 3D (LAMO3D)²⁸, que dispunha de máquinas de corte a *laser*, utilizadas no experimento.

Esta adequação ao formato de disciplina fez com que o experimento se realizasse ao longo de quatro meses, de abril a julho de 2016, não sendo uma atividade intensiva, como usualmente seria um *workshop*. Ainda quanto à adequação, não se adotou a fabricação digital de protótipo 1:1 como produto final, o que pode ocorrer em alguns *workshop*, optou-se pela prototipagem rápida de maquetes em escala reduzida. Isso demandou menores recursos financeiros que a construção de algo maior, sem que se abandonasse a materialização, mantendo-se a construção do que se concebeu, mesmo que fosse um modelo físico reduzido.

Delimitou-se como universo de pesquisa os alunos do Curso de Graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAU-UFRJ, que já tivessem cursado as 180 horas-aula obrigatórias relativas à geometria descritiva, tendo obtido aprovação nas duas disciplinas relativas a estes conteúdos, contidas na grade curricular nos dois primeiros dos dez semestres totais do referido curso, o que compreenderia alunos do terceiro ao décimo períodos. A primeira metade deste conteúdo, 90 horas-aula, é ministrado na disciplina de Geometria Descritiva 1 (GD1), com *Ementa* e *Plano de Curso* exibidos nos respectivos anexos B e C; a segunda metade do conteúdo, na disciplina de Geometria Descritiva 2 (GD2), com *Ementa* e *Plano de Curso* nos respectivos anexos D e E.

Do universo foram extraídos vinte e cinco indivíduos, que compuseram a amostra. Isso foi feito pelo oferecimento de vinte e cinco vagas na disciplina Geometria Descritiva Aplicada à Arquitetura (GDA), a garantir que os indivíduos

²⁷ Uma hora-aula na FAU/UFRJ corresponde a 50 minutos.

²⁸ Para saber mais sobre o LAMO3D acessar: <http://www.fau.ufrj.br/lamo3d/>

fariam parte do universo definido para o experimento foi o fato da disciplina exigir, como pré-requisitos, as disciplinas GD1 e GD2.

Os indivíduos, dotados de conhecimentos em geometria descritiva, foram também observados lidando com a forma de maneira distinta da que lhes seria usual, alternando-se os processos 2D e 3D e as ferramentas gráfica, com a introdução de ferramentas CAD. Isso foi feito de maneira que o pesquisador, que os observava, pudesse colher dados do experimento, por meio da observação direta intensiva (LAKATOS; MARCONI, 2005). Os dados extraídos do experimento foram objeto de análise e interpretação, com abordagem qualitativa.

O número de indivíduos da nossa amostra nos pareceu ideal a uma pesquisa qualitativa; segundo Minayo (1999), uma das características que mais diferenciam a pesquisa qualitativa da quantitativa, em relação à amostragem, é a quantidade de sujeitos sociais pesquisados. Esse número não deve ser muito grande, mas deve ser suficientemente pequeno, de forma a permitir que o pesquisador seja capaz de conhecer bem o objeto de estudo.

Quanto à representatividade da amostra, diz Minayo (2015, p. 35) que uma amostra é considerada representativa *“quando ela apresenta as mesmas características gerais da população da qual foi extraída”*. Dentre as características gerais que nos interessaram foi a de contar com indivíduos conhecedores da geometria descritiva, habituados a operar a forma por meio da *épura* e de ferramenta analógicas. Esta característica já nos estaria garantida pelo fato dos conteúdos relativos à geometria descritiva, apresentados nas 180 horas obrigatórias na FAU-UFRJ, caracterizam-se por processos de gerar, manipular, representar e construir a forma geométrica intermediados pela *épura*, sempre realizados por meio de ferramentas analógicas.

Podemos caracterizar o ensino de geometria descritiva na FAU-UFRJ como tradicional, quanto ao aspecto de abordar as operações sobre a forma, melhor que classificá-lo assim será discorrer como tradicionalmente se opera a forma com a descritiva. Na descritiva operamos no espaço euclidiano, toda a forma teria como sua menor porção o ponto, que por sua vez se localizaria no espaço por três coordenadas cartesianas, usualmente denominadas *abscissa*, *afastamento* e *cota*, ou $(x; y; z)$. Do ponto geram-se ou definem-se as primeiras formas, apoiando-se em

axiomas²⁹, como uma reta sendo definida a partir da linha que mede a menor distância entre dois pontos. Podemos também definir um plano por três pontos não alinhados, por duas retas paralelas ou concorrentes, ou mesmo por uma reta e um ponto não pertencente a esta reta. Com pontos, retas e planos geram-se os poliedros; com os poliedros gerados podemos seccioná-los por planos ou interseccioná-los com outros poliedros.

O parágrafo anterior, acompanhado dos *métodos descritivos*³⁰, resume aproximadamente metade do conteúdo de geometria descritiva ministrado aos alunos na FAU-UFRJ, o que corresponde, aproximadamente, ao conteúdo da disciplina GD1. Uma extrapolação para outras universidades seria indevida, já que nem sempre precise se adotar esta divisão, às vezes o conteúdo de descritiva pode ser ministrado em disciplinas com nomes como *Sistemas Projetivos*; mas é comum que o ensino da descritiva se inicie por poliedros e suas partes constituintes: pontos, retas e planos.

A outra metade, que na FAU-UFRJ equivale à GD2, se refere ao estudo das curvas e superfícies. Livros de referência em geometria descritiva, como os de Rodrigues (1964, 1968), adotam igual divisão; o primeiro se intitula *Geometria descritiva: operações fundamentais e poliedros*, o segundo recebe o nome de *Geometria descritiva: projetividades, curvas e superfícies*.

Sobre essa *segunda parte*, observemos, na figura 64, o quadro sinótico das superfícies geométricas, baseado na classificação proposta por Gaspard Monge, e elaborada por Ortiz Monteiro (apud RODRIGUES, 1968, p.248), que nos chama a atenção para o fato de Monge ter se orientado pela “*forma, como meio único e racional de grupá-las em classes, divisões e famílias, dotadas de propriedades geométricas comuns*”. Monge não chegaria a esses agrupamentos de superfícies se tivesse adotado como critério o grau da equação, tal como na geometria analítica, que por tal critério acaba por agrupar formas díspares.

²⁹ Premissa considerada necessariamente evidente e verdadeira, fundamento de uma demonstração, porém ela mesma indemonstrável, originada, segundo a tradição racionalista, de princípios inatos da consciência ou, segundo os empiristas, de generalizações da observação empírica (fonte: <https://www.priberam.pt/dlpo/axioma>, acesso em 15/11/2016).

³⁰ Mudança de Plano, Rotação e Rebatimento; são operações sobre a forma utilizadas em geometria descritiva, majoritariamente para resolver problemas, por meio da alteração da posição dos objetos em relação aos planos de projeção.

Os indivíduos do experimento de pesquisa tinham, como repertório formal geométrico, além dos poliedros, as formas³¹ relacionadas na figura 64, estando aptos a gerá-las, manipulá-las, representá-las e construí-las por intermediação de duas projeções conjugadas, como se faz em épura.

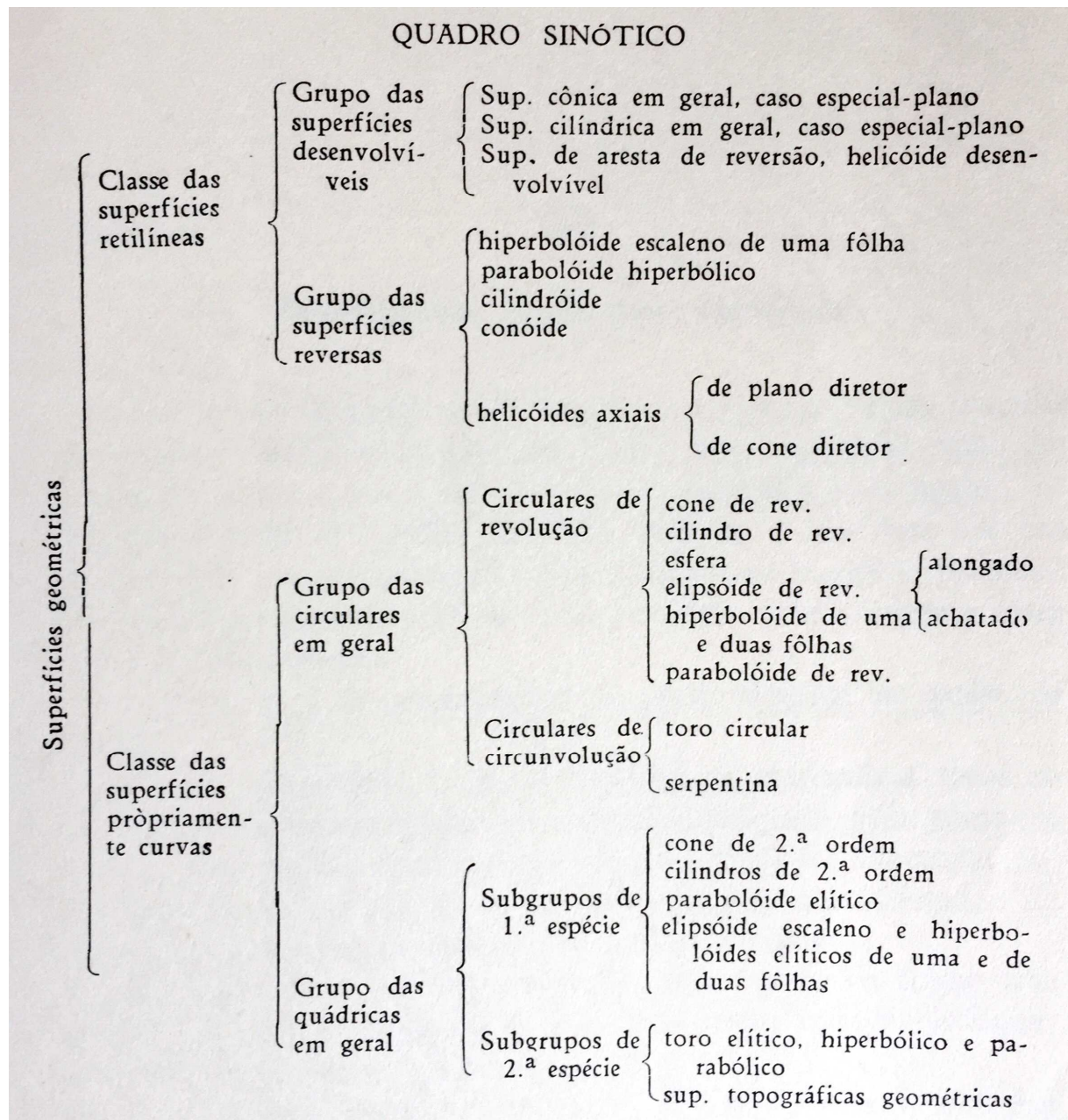


Figura 64: superfícies geométricas, classificação segundo Monge, por Ortiz Monteiro

Fonte: Rodrigues, 1968, p.267

Agora vamos à aplicação do experimento, no capítulo que se segue.

³¹ Para visualizar essas formas, seja em modelos tridimensionais, seja em representação em épura, consultar <http://gd.fau.ufrj.br/exercicios.htm>

3 APLICAÇÃO DO EXPERIMENTO

Este capítulo trata da aplicação do experimento a um grupo de alunos, do Curso de Graduação em Arquitetura e Urbanismo, da FAU-UFRJ, finaliza-se articulando os resultados do experimento com a hipótese e premissas da pesquisa.

O experimento iniciou-se em seis de abril de 2016, em uma turma 25 alunos, com o primeiro dos 15 dias de aula da disciplina *Geometria Descritiva Aplicada à Arquitetura*, ministrada com frequência semanal de 4 tempos ininterruptos.

Já na primeira aula, o professor, que é a mesma pessoa do pesquisador que aplicou e observou o experimento, facultou a cada um dos alunos a participação na pesquisa como componente da amostra a ser observada, dando ciência aos mesmos dos detalhes do experimento, esclareceu que uma eventual negação de participação não inviabilizaria o aluno de cursar a disciplina, nem influenciaria em sua avaliação. Foi distribuído aos alunos um *Termo de Consentimento* (ver apêndice A) e todos os 25 alunos o leram e assinaram, concordando espontaneamente em fazer parte do experimento.

A seguir, o professor fez uma série de perguntas à turma, oralmente e dirigindo-se ao grupo, para verificar se a amostra seria representativa e confirmou-se que sim. Confirmou-se que os alunos operavam a forma majoritariamente por PI2D, a maioria com ferramentas analógicas e alguns com analógicas e digitais. A amostra contou com ao menos um aluno que cursasse cada um dos períodos, do terceiro ao décimo, do referido Curso de Graduação, confirmou-se que todos os alunos haviam cursado as 180 horas-aula de GD1 e GD2. Os alunos se definiam, ou se percebiam, como pouco conhecedores de ferramentas digitais, alguns deles chegaram a relatar não ter prática alguma de desenho com essas ferramentas.

De todo o grupo, 3/4 conheciam o *AutoCAD*, já o utilizavam para a confecção de representações bidimensionais em arquitetura e urbanismo (PI2D), em seu Curso de Graduação, confeccionando plantas baixas, vistas e cortes; 1/4 da amostra já havia utilizado o *Sketchup* para uma precária, assim eles a qualificaram, aproximação à modelagem 3D; igualmente 1/4 da amostra relatou ter conhecimento de *Revit*, software de plataforma BIM, que não utilizavam em ambiente acadêmico mas sim em estágios em escritórios de arquitetura e urbanismo. O conhecimento de

Rhinoceros foi relatado por apenas um dos alunos, mesmo assim definindo-o como incipiente, sendo que a maioria da turma sequer havia visto esta ferramenta em operação, seja em estágio, seja em ambiente acadêmico. Quanto ao *Grasshopper*, funcionando conjugado ao *Rhinoceros* a utilizar a *Programação Visual*, sequer um aluno já os tinham visto em operação, tampouco algum aluno sabia utilizar outra ferramenta CAD de Programação visual, ou mesmo sabia programar por *script*.

Por fim, constatamos que nossa amostra contou majoritariamente com indivíduos que utilizavam o processo PI2D, seja com ferramentas analógicas ou digitais, mesmo com a utilização por alguns de ferramentas BIM, que possam contar com PC3D. Destacamos que essa modelagem 3D em ferramenta BIM pode, por vezes, resultar de uma mera extrusão de uma planta-baixa, sem contar com ferramentas CAD integradas que se voltem ao *Design Computacional* (AISH, 2013). Ao olharmos o quadro 2³², elaborado por Aish (2013, p.40), vemos as três eras das ferramentas CAD e constatamos que a maioria dos indivíduos de nossa amostra vivia a primeira era, com alguns já na segunda era em ambiente de estágio, sequer um destes indivíduos vivia a terceira era.

Cada aluno dispunha de notebook próprio, com as ferramentas CAD instaladas sem custo, ou por serem versões educacionais, temporárias para teste, ou mesmo gratuitas. Quanto ao espaço físico, doze das quinze aulas foram ministradas em sala de aula regular, com mesas grandes e baixas, com espaço para se dispor tanto o notebook como o material de desenho analógico, lado a lado; havia acesso a tomadas de eletricidade e a uma conexão *wifi* aberta, que se mostrou instável e intermitente, fato que dificultou mas não inviabilizou os trabalhos. O professor dispunha de notebook e projetor *datashow*, projetava sobre tela a maioria das atividades que conduzia com os alunos, a sala contava com quadro negro e giz, que foram esporadicamente utilizados, assim como uma mesa com tampo de vidro, destinada para corte de material para a elaboração de maquetes.

Três das quinze aulas forma ministradas no Laboratório de Modelos 3D (LAMO3D), da FAU-UFRJ, que, além de replicar a mesma estrutura física já relatada para a sala de aula convencional, dispunha de máquina de corte a *laser*, que foi utilizada pelos alunos no experimento; o laboratório contava também com outros

³² Ver na página 77.

equipamentos, que não chegaram a ser utilizados, como impressoras 3D de baixa resolução, por método aditivo.

A condução das aulas obedeceu a um planejamento que admitisse adaptações, que também permitisse adotar um caráter exploratório no decorrer do experimento (ver Plano de Curso no apêndice B); o curso, assim como o experimento, acabaram por se dividir em duas partes, cada uma delas teve como elemento unificador um *Objeto*, a partir do qual foram feitos diversos exercícios. Adotamos essa mesma divisão nas duas seções seguintes desse capítulo, nas quais apresentaremos as partes 1 e 2 do experimento, relacionando-as com os dois *Objetos* do experimento: *Objeto 1* e *Objeto 2*.

Os *Objetos* foram operados considerando o conceito de Mundo Projetual de Mitchell (2008), como objetos geométricos que remetam a objetos arquitetônicos por simplificação geométrica, neles executaram-se operações em etapas análogas a de um projeto arquitetônico: concebendo-o (gerar e manipular), representando-o e construindo-o.

3.1 OBJETO 1

Começamos com um percurso pelos processos (PI2D e PC3D) e ferramentas, durante nossas primeiras oito das quinze aulas do curso (ver quadro 4). Essa primeira parte do experimento reproduziu a cronologia, na qual foram introduzidos os processos PI2D e PC3D e as ferramentas gráficas, na prática da arquitetura e urbanismo. Foi um percurso iniciado no analógico 2D até o digital 3D com programação visual, assim, o *Objeto 1* foi operado sequencialmente nos ambientes 1, 2, 3 e 4³³.

AULA	DIA		CONTEÚDO DA AULA
01	Qua	06	abr Apresentação do curso / Objeto 1.0: definição geométrica , PI2D por épura analógica e relações com as representações gráficas em arquitetura.
02	Qua	13	Objeto 1.0 em PI2D: épura analógica e desenvolvimento (planificação e execução de maquete de estudo).
03	Qua	20	Objeto 1.0 em PI2D: desenho digital em AutoCAD 2D / representações gráficas em arquitetura e relações com a épura / planificar e executar maquete de estudo / desenho digital e corte manual).
04	Qua	27	Objeto 1.0 em PC3D: modelagem digital em Rhinoceros / diversas maneiras de se gerar a mesma forma / planificação automática / vistas e perspectivas a partir do modelo digital.
05	Qua	04	mai Objeto 1.0 em PC3D: introdução à programação visual com algoritmos em Grasshopper + Rhinoceros / elaboração do algoritmo-base para o objeto 1.1
06	Qua	11	Objeto 1.1 a partir do 1.0 em PC3D: Geração de formas a partir do algoritmo-base e composição / vistas e perspectivas a partir do modelo digital / plotagem / planificação digital da maquete.
07	Qua	18	Local: LAMO / Objeto 1.1 em PC3D: montagem da maquete de estudo 1/100, corte a laser e montagem da maquete final em 1/50.
08	Qua	25	Objeto 1.1 em PC3D: finalização do trabalho (retardatários) / exibição dos trabalhos / discussão da experiência.

Quadro 4: aulas 01 a 08 - *Objeto 1* nos 4 ambientes.

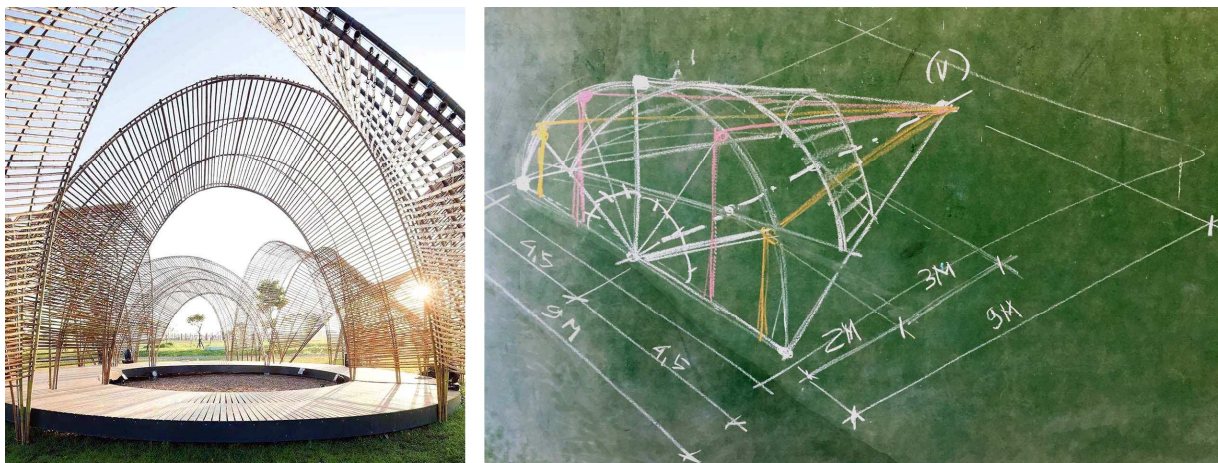
Fonte: o autor, 2016

Já na primeira aula, ou **aula 01**, após a concordância dos alunos em participar da pesquisa e do levantamento do conhecimento dos mesmos sobre ferramentas CAD, procedemos à apresentação do curso e ao início do primeiro exercício. Começamos por definir o primeiro objeto, ou *Objeto 1*.

A partir da figura 65, que mostra uma construção provisória na *XXI Triennale di Milano*, realizada em 2016, pedimos aos alunos que observassem a forma, destacando da composição um de seus elementos, que seria qualquer uma das superfícies curvas. Este elemento seria submetido a uma *simplificação geométrica*, ao ser trazido do Mundo Real para o Mundo Projetual³⁴ de Mitchell (2008) e lido como objeto geométrico, que remeteria a um objeto arquitetônico.

³³ Para rever os ambientes consultar quadro 3, na página 85.

³⁴ Para Mundo Real e Mundo Projetual rever figura 8.



Figuras 65 / 66: referência arquitetônica / simplificação e definição geométricas
 Fontes: Degross - <https://scontent-grt2-1.xx.fbcdn.net/hphotos-xpf1> (acesso em 10/04/2016) / o autor, 2016

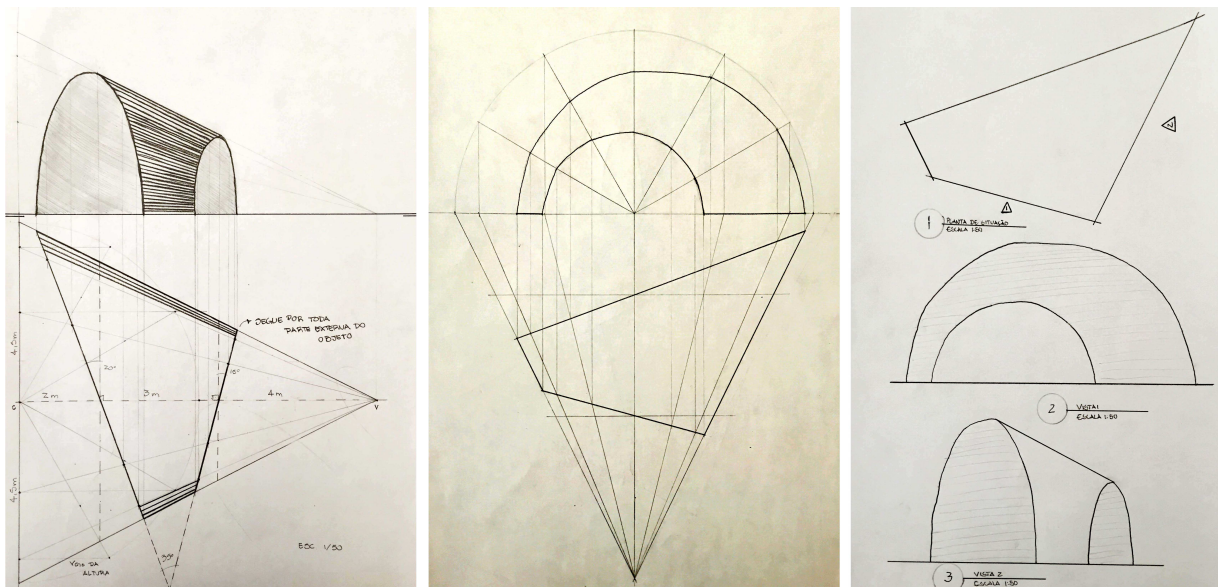
Os alunos, indivíduos da amostra, já dispunham de um repertório formal de superfícies³⁵, presente nos programas de curso relativos às 180 horas-aula de geometria descritiva que todos haviam cursado; desse repertório escolheram a superfície que mais se assemelhasse ao que viam na imagem, não houve acesso ao projeto da construção provisória, nem a qualquer outra informação que não fosse a imagem da figura 65.

A turma, em conjunto e com o apoio do professor, elaborou uma *definição geométrica* da forma, graficamente representada pela perspectiva exposta no quadro negro, elaborada imediatamente após a definição ser concluída (ver figura 66); com base em seu repertório formal, o grupo de alunos definiu a forma como um trecho de superfície cônica de revolução, ou superfície que envolve um semicone de revolução, eixo deste cone no chão, sua altura (distância de sua base ao vértice) e o diâmetro de sua base iguais a 9 metros. São limites deste trecho de superfície dois planos verticais, um plano corta o eixo do cone a 2 metros do centro de sua base e faz com este eixo ângulo de 20° , o outro plano corta o eixo distante 5 metros do centro de sua base e faz com o eixo ângulo de 15° ; os planos fazem, entre si, ângulo de 35° . Esses dois planos verticais produzem seções no semicone, ou, melhor dizendo, na superfície que o envolve.

A definição geométrica levou em conta medidas que pudessem resultar em uma construção habitável, ao menos quanto às dimensões, que abrigasse um adulto de pé, que não diferisse muito das proporções das formas expressas na figura 65.

³⁵ Para o repertório de superfícies de GD1 e GD2 rever figura 64, na página 90.

Esta definição geométrica foi expressa pelos alunos nos 4 ambientes de projeto, ao longo de toda a primeira parte do experimento, no momento deste exercício foi expressa em *ambiente 1*, ou *Analógico + PI2D* (ver figuras 67, 68 e 69):



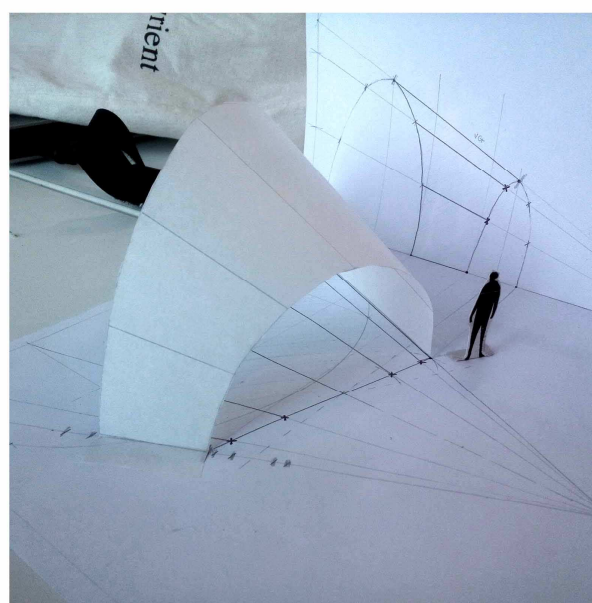
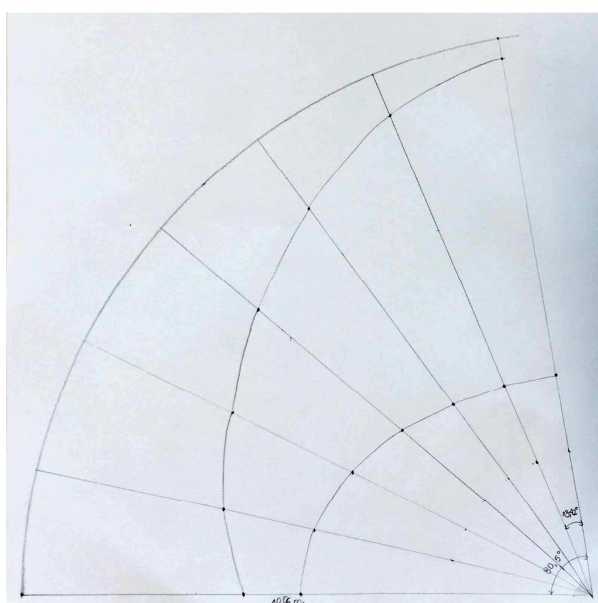
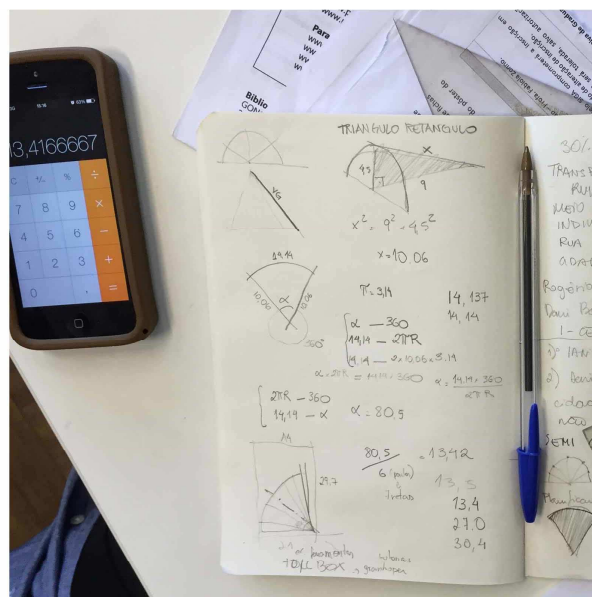
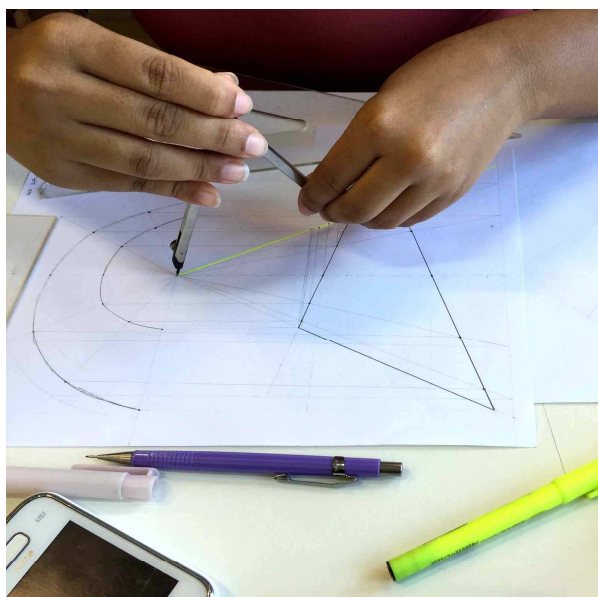
Figuras 67 / 68 / 69: épora posição 1 / épora posição 2 / vistas
Fonte: o autor, 2016

Sobre uma folha A4, com ferramentas analógicas, construíram-se épuras, alternando-se a posição do objeto em relação aos planos de projeção, como se vê nas figuras 67 e 68. A seguir, os alunos fizeram a transposição para vistas, uma superior e duas laterais (ver figura 69), representações sumárias que remetiam às de arquitetura como plantas de situação e fachadas, todos os desenhos foram realizados na mesma escala: 1/50, após testarem-se outras escalas, como a 1/100.

Alguma imprecisão de traçado ocorreu nos desenhos analógicos, na parte superior da figura 68 observamos duas semi-elipses, que tiveram que ser traçadas à mão, passando por sete pontos graficamente determinados, nas figuras 67 e 69 ocorreu a mesma situação de imprecisão de traçado.

A aula 01 se encarregou das etapas de *conceber* (gerar e manipular) a forma, assim como a de *representá-la*, no ambiente 1. A **aula 02** se inicia com a *construção* ou *materialização* da forma, no mesmo ambiente 1 de projeto.

Para a *construção*, na mesma escala 1/50, houve que se saber as medidas dos elementos do objeto, alguns elementos já expressavam estas medidas diretamente no desenho (figura 70), os que não as expressavam foram objeto de operações denominadas *métodos descritivos*, a fim de obtê-las. Houve a necessidade de se calcular (figura 71) a transformação que a semicircunferência da base do semicone sofreria na planificação (figura 72); por último fez-se o corte manual do trecho de superfície planificado e construiu-se uma maquete sumária sobre a *épura* dobrada (figura 73), com dobra justo na interseção dos planos de projeção, onde se situava a *linha de terra*. Encerra-se a operação sobre a forma no *ambiente 1*.

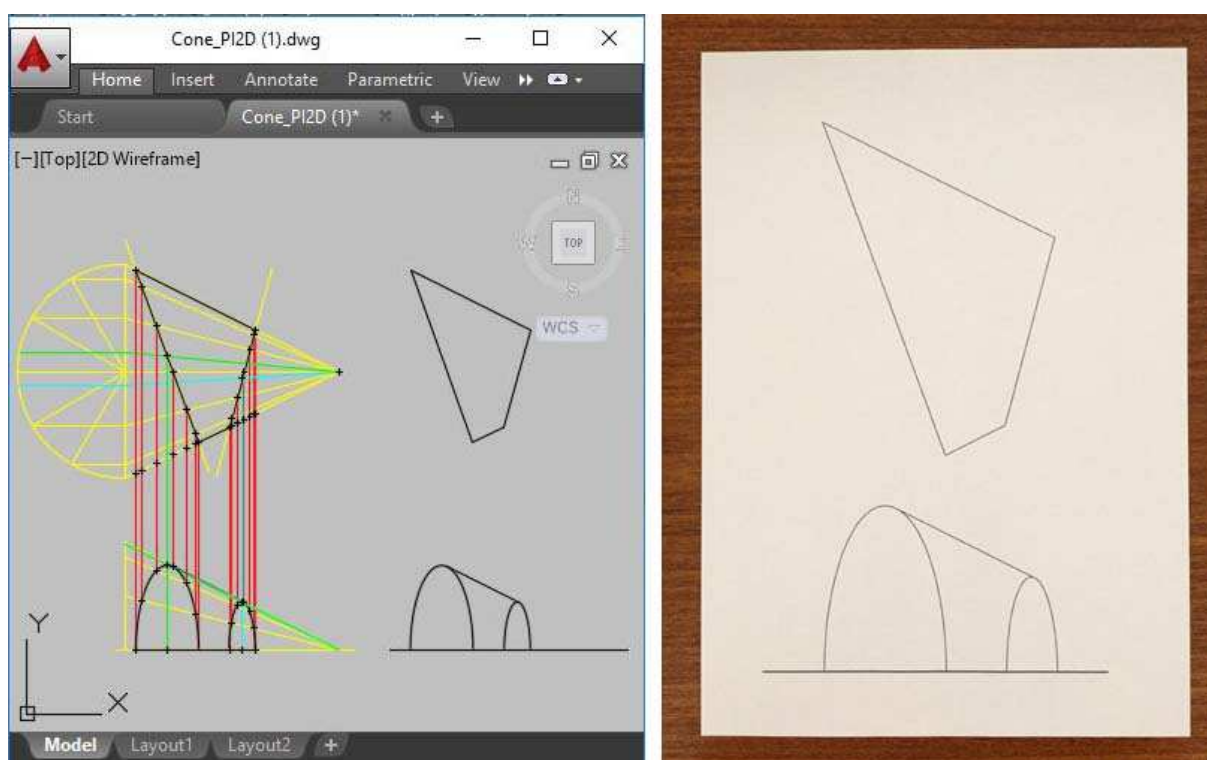


Figuras 70 / 71 / 72 / 73: determinação gráfica de medidas em *épura* / cálculo das transformações em planificação / planificação / maquete e sistema diédrico

Fonte: o autor, 2016

Na **aula 03** passou-se às mesmas operações em *ambiente 2, Digital + PI2D*, a diferença principal foi a utilização de um *software*, o AutoCAD 2016. O mesmo objeto, com a mesma definição geométrica, foi elaborado exclusivamente em interface gráfica 2D (figura 74), apesar da ferramenta oferecer outros recursos.

Primeiro fez-se a vista superior, a seguir a vista frontal foi elaborada logo abaixo, intencionalmente deslocada da posição adotada no ambiente 1, reforçando-se a ideia que o mais importante no processo PI2D seria a relação conjugada que se estabelece entre as projeções, relacionando-as. Estabelecida a relação entre as vistas operou-se a forma, concebendo-a por geração e determinando duas seções, chegando à representação (figura 75).

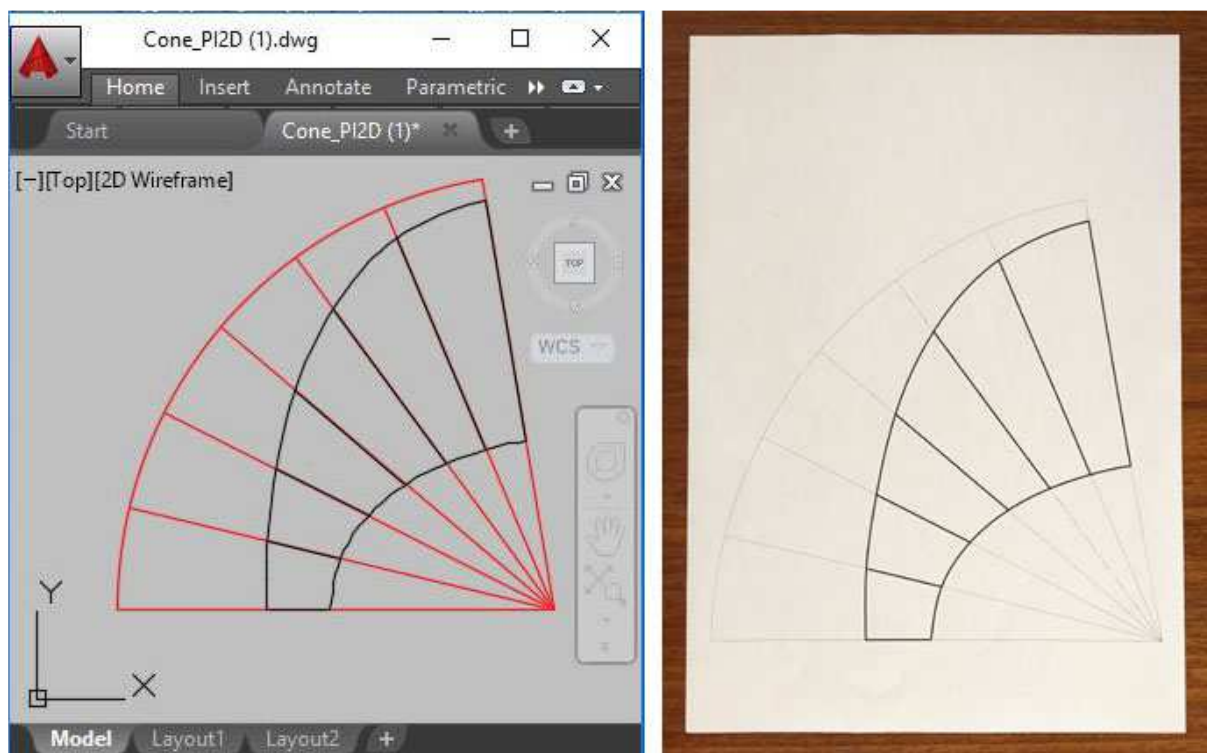


Figuras 74 / 75: Digital+PI2D constrói vistas superior e frontal / impressão em A4 na escala 1/50
Fonte: o autor, 2016

A ferramenta CAD foi novidade para alguns alunos, apesar disso conseguiram utilizá-la sem maiores problemas. Retirando-se diversas linhas do desenho, vistas sumárias (superior e frontal) foram elaboradas, e, a seguir impressas em papel A4 (figura 75).

A ferramenta digital deu precisão ao desenho, notável no traçado das duas semi-elipses; ofereceu versatilidade na escolha da escala do desenho para impressão, trouxe facilidades operacionais ao processo PI2D, já conhecido dos

alunos, mas não alterou o processo, fundamentalmente. As facilidades se manifestaram também na construção do modelo reduzido, cuja etapa de planificação se vê na figura 76 e na respectiva impressão, em escala, na figura 77. A ferramenta CAD permitiu até que se suprimissem todos os cálculos, necessários no ambiente 1, exibidos na figura 71, relativos à definição da curva da base do semicone, ao ser transformada na planificação.



Figuras 76 / 77: planificação com ferramenta CAD / planificação impressa em A4 na escala 1/50
Fonte: o autor, 2016

Optou-se por imprimir, em impressora comum e papel sulfite A4, e se cortar à mão, embora a digitalização da planificação já permitisse o corte a *laser*. Chega-se, ao fim do exercício e da aula, a uma maquete semelhante à da figura 73.

Na **aula 04**, os alunos são levados ao *ambiente 3*, ou *Digital + PC3D*, a ferramenta digital principal é o *Rhinoceros 5.0*, utilizado no *Processo de Construção Tridimensional* de um objeto virtual, ou PC3D.

Os alunos começaram a modelar o mesmo semicone. Inicialmente o exercício teve um caráter exploratório, procurando diversas maneiras de se chegar ao modelo do semicone, os alunos identificaram 5 maneiras distintas: por revolução, ao rodar uma reta ao redor de seu eixo; por extrusão da curva da base em direção ao vértice, construindo um cone inteiro e subtraindo algumas de suas partes;

apoiando uma série de retas simultaneamente na curva da base e no vértice, ou fazendo uma reta percorrer um caminho curvo expresso pela semicircunferência da base do cone. Chegou-se à mesma forma por procedimentos diversos, sugeridos pelos próprios alunos que, com o auxílio do professor, buscavam nos menus do *software* comandos que promovessem cada um desses cinco procedimentos.

Cada aluno elegeu sua maneira preferida de gerar o cone e assim o fez, em seguida modelou os planos secantes, como se veem à esquerda da figura 78:

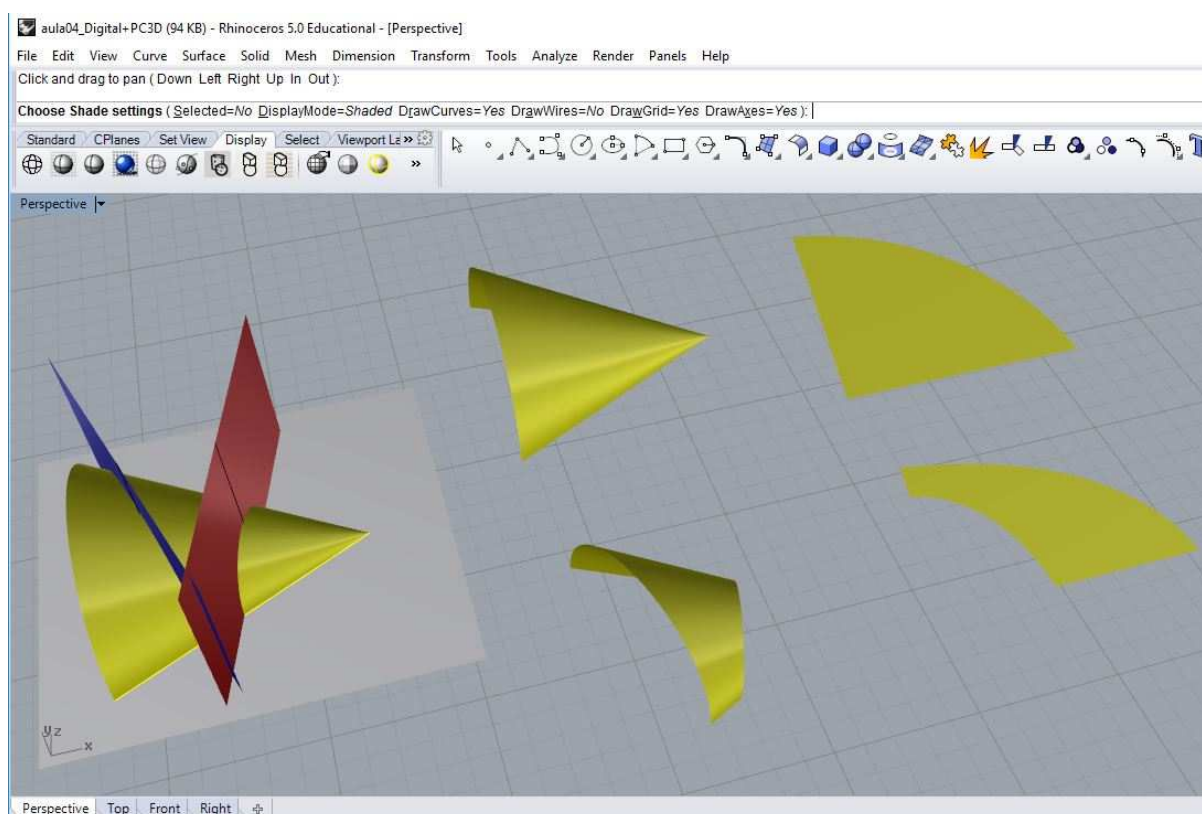


Figura 78: modelagem, seção e planificação da superfície no ambiente 3

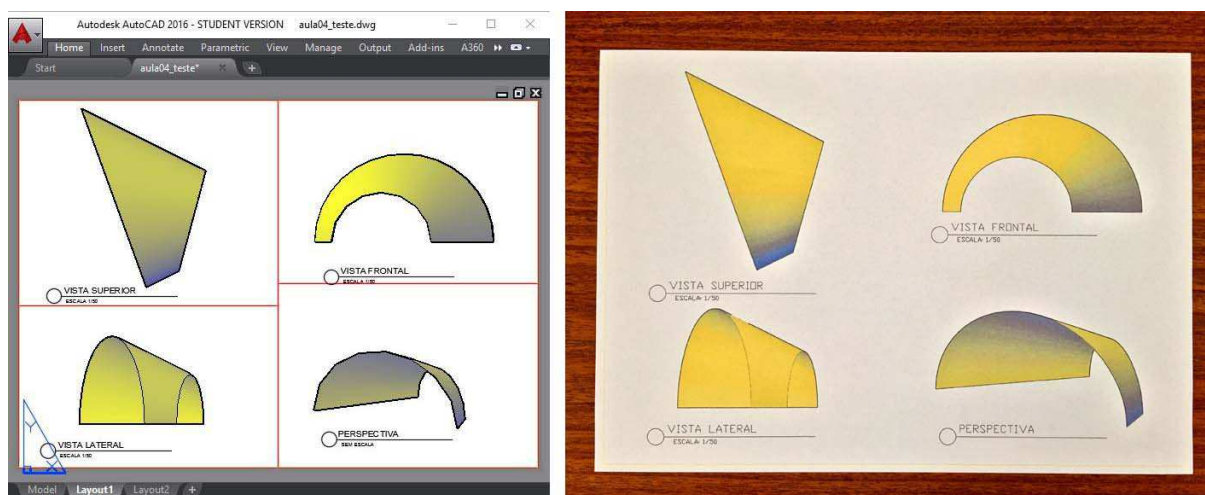
Fonte: o autor, 2016

Do modelo, extraíram, tanto a superfície do semicone, como só a parte compreendida entre os planos secantes, ambas ao centro da figura 78; as suas respectivas planificações, vistas à direita, foram obtidas de maneira automática, utilizando-se o comando *unroll*, planificações feitas e prontas a serem impressas em sulfite e cortadas à mão, ou seguirem para a cortadora a *laser*.

Foi notável a facilidade em se chegar à planificação, sem que se passasse pela representação de projeções cilíndrico-ortogonais análogas a plantas baixas e vistas. Houve uma trajetória direta, da concepção para a construção, foi feita uma analogia às operações *file-to-factory*, em breve explanação aos alunos.

Mesmo com a forma já construída, foi feita a sua representação, a partir do modelo virtual já pronto no *Rhinoceros*. Interessou-nos a trajetória do modelo digital até a representação impressa em papel sulfite A3 na figura 80. Isso passou por exportamos apenas o trecho da superfície, entre os dois planos secantes, para o *AutoCAD*, ferramenta já utilizada na aula anterior.

No *AutoCAD* (figura 79), foram abertas quatro janelas, em uma única folha branca virtual no tamanho A3; em cada uma das janelas, o único objeto foi visto de uma posição, produzindo uma vista superior e duas laterais na escala escolhida de 1/50, análogas a projeções cilíndrico-ortogonais da descritiva, e uma perspectiva. Como produto final dessa operação, obtivemos uma representação impressa, na mídia folha de sulfite, em formato A3 (figura 80).



Figuras 79 / 80: vistas obtidas no AutoCAD / impressão da representação gráfica em A3

Fonte: o autor, 2016

Na **aula 05** passamos ao ambiente 4, *Digital + PC3D + Programação Visual*, nesse ambiente as ferramentas CAD *Rhinoceros 5.0* e *Grasshopper 1.0* forma utilizadas integradas, o que permitiu a *programação visual*. Cada aluno abriu, em sua tela de notebook, duas janelas, uma exibia o *Rhinoceros* e a outra o *Grasshopper*, vistas simultaneamente lado a lado, tal como na figura 63. Nesse momento, os alunos desconheciam ainda o *Grasshopper*.

Iniciamos a aula no ambiente 4, com a construção de algoritmos, que são uma sequência de regras definidas do início ao fim. Estas regras foram elaboradas conjuntamente por toda a turma no *Grasshopper*, a expressar a *definição geométrica*³⁶ do mesmo *Objeto 1*, o que fez exibir na tela do notebook, na janela

³⁶ Rever a definição geométrica do *Objeto 1* expressa na figura 66.

relativa ao *Rhinoceros*, o que vemos na figura 81, ainda sem destacarmos o trecho da superfície entre os dois planos secantes, que corresponderia ao *Objeto 1*.

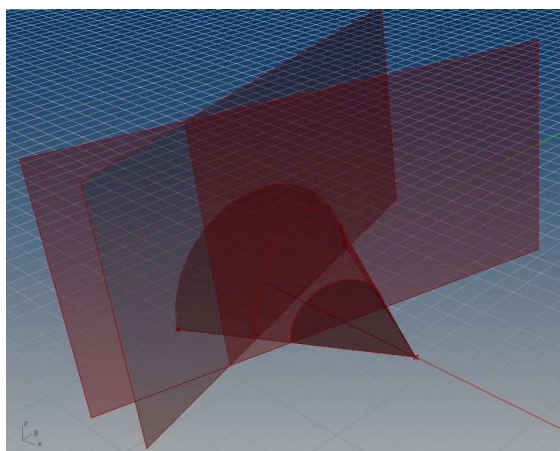


Figura 81: superfície e duas seções
Fonte: o autor, 2016

Na janela relativa ao Grasshopper, exibida na figura 82, observamos cinco retângulos; os três retângulos superiores deram regras a definir o vértice do cone, a semicircunferência de sua base, e a geração da superfície; os dois retângulos, logo abaixo, definiram cada um dos planos secantes.

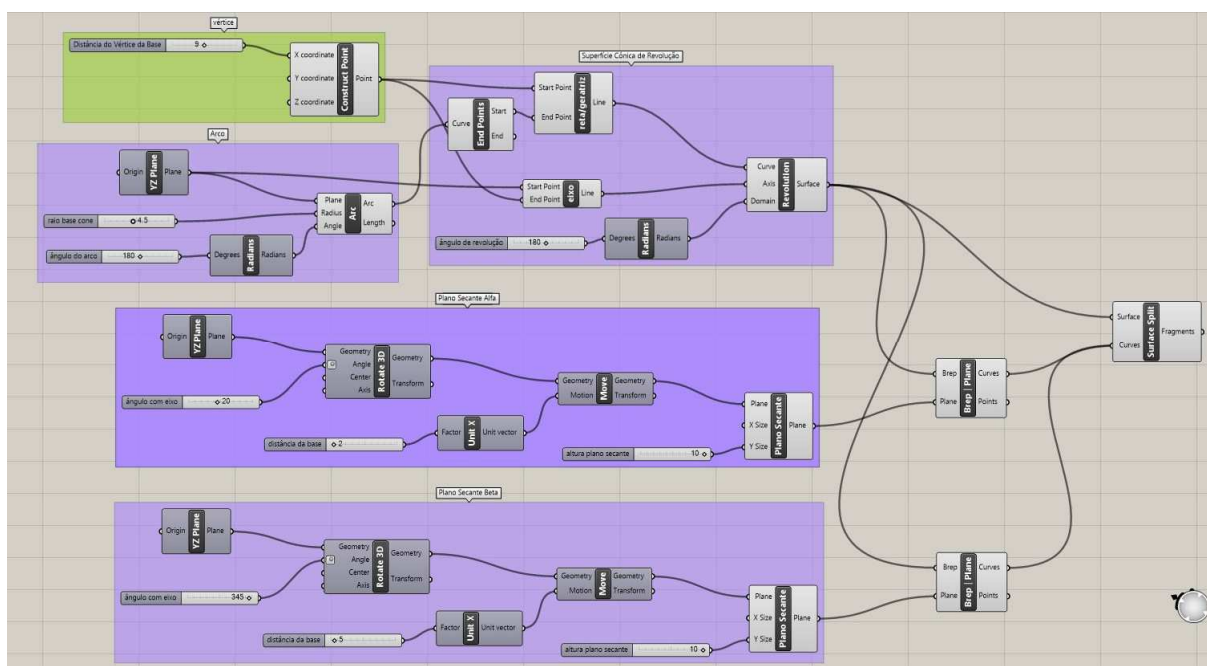


Figura 82: algoritmo em Grasshopper - superfície e planos secantes
Fonte: o autor, 2016

A estas regras foram aplicados os valores numéricos, relativos ao *Objeto 1*, no retângulo verde aplicou-se o valor 9, definido a altura de 9m para o cone; no relativo à semicircunferência aplicou-se o valor 4,5m, para o raio, determinando diâmetro de 9m; assim se prosseguiu ao aplicarmos os mesmos valores para o

ângulo que os planos secantes fariam com o eixo do cone, e daí por diante. Enfim, valores que gerassem o *Objeto 1* idêntico aos dos exercícios anteriores.

A seguir, à medida que se faziam alterações em cada um destes valores numéricos, o *Rhinoceros* as mostrava no modelo, em tela e em tempo real, que equivaleria ao que se vê na figura 81, a dinâmica dessas alterações. Vimos acontecer o aumento ou diminuição da altura do semicone, ou do diâmetro de sua base; a alteração do ângulo dos planos secantes como eixo do cone, ou mesmo na posição em que os planos cortariam este eixo. Embora houvesse a alteração de *parâmetros*, que no caso eram numéricos, a sequência de ordens, do início ao fim (algoritmo), estava preservada e continuava a ser executada, assim os alunos foram apresentados não só aos algoritmos, mas à *parametrização*.

Apesar da ferramenta CAD *Grasshopper* ser inédita aos indivíduos da amostra, todos a operaram com facilidade, mostrando compreender os princípios da programação visual. Contribuiu, a esse bom entendimento, o fato dos alunos terem elaborado seus algoritmos aplicando regras que já lhes seriam usuais em geometria, recém aplicadas em exercícios imediatamente anteriores, como as regras para gerar uma superfície de revolução, por exemplo. Outro fator facilitador foi termos o mesmo objeto nos diversos exercícios. Tudo isso contribuiu para que os alunos notassem as diferenças existentes entre os quatro ambientes de uso das ferramentas CAD, onde chegaram à construção de um mesmo objeto, de maneiras diversas³⁷.

Neste último exercício, o foco foi na operação de *conceber* a forma, por sua geração geométrica seguida de uma manipulação por seções, a novidade foi quanto ao ambiente no qual ocorreu a concepção, o ambiente 4, que contou com programação visual, apresentando algoritmos e parametrização. As etapas de operação da forma relativas à sua *representação* 2D, ou à sua *construção*, não foram executadas, visto que repetiriam, deste ponto em diante, os mesmos procedimentos do exercício já realizado no ambiente 3.

Neste ponto do experimento, ao fim da aula 05, os alunos já haviam operado a forma nos 4 ambientes, concebendo-a, representando-a e construindo-a, assim como já tinham sido apresentados a todas as ferramentas CAD utilizadas no experimento. Nesta vivência, de cinco aulas, os alunos haviam sido estimulados a

³⁷ Rever quadro 3, na página 85.

perceber que, idênticas operações espaciais, com a forma, se realizam de maneiras diversas, quando há a alternância de ferramentas e de seus respectivos ambientes 1, 2, 3 e 4, podendo, mesmo assim, se chegar aos mesmos produtos.

Na **aula 06**, ainda no ambiente 4, o algoritmo elaborado na aula anterior foi retomado. Formaram-se equipes de dois alunos e cada uma delas, com este algoritmo, gerou ao menos quatro trechos de superfícies cônicas de revolução, alterando estes seis parâmetros: do semicone, o *raio* e sua *altura* H ; de cada plano secante, denominados de α e β , o *ângulo* do mesmo com o eixo do cone, assim como a *distância* do centro da base do cone ao ponto de cruzamento do plano secante com o eixo cone.

Cada equipe obteve a sua família de trechos de superfícies, oriunda do mesmo algoritmo, na figura 83 observamos uma delas. Os parâmetros alterados foram grafados abaixo de cada trecho.

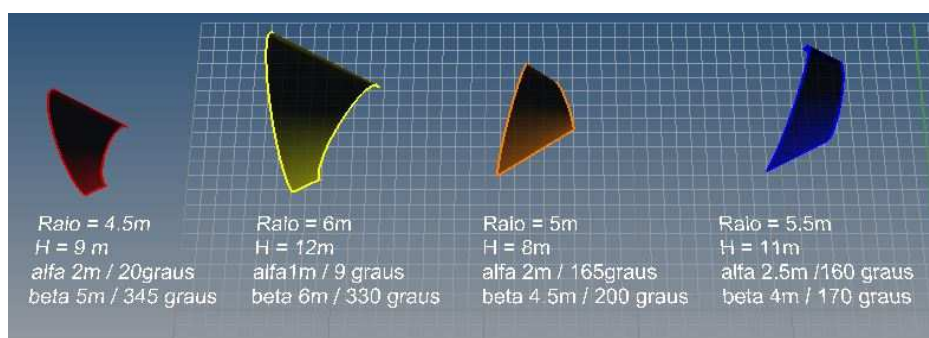


Figura 83: família de quatro trechos de superfícies cônicas
Fonte: o autor, 2016

Família definida, passamos ao ambiente 3 e a operar somente com o *Rhinoceros*; ali, cada equipe elaborou uma composição arquitetônica habitável, que utilizou trechos de superfície de sua família, podendo usar trechos repetidos, identificados pela mesma cor, tal como o da figura 84.

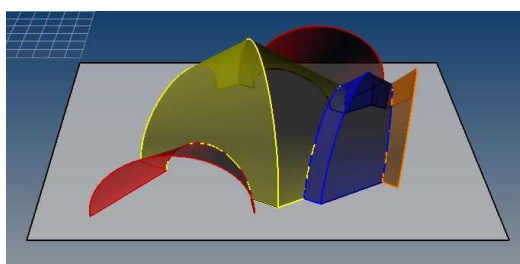


Figura 84: composição com sete trechos de superfície
Fonte: o autor, 2016

A maioria das equipes optou por composições que configurassem um pavilhão, que denominamos de *Objeto 1.1*, por ser uma variação do *Objeto 1*. O *Rhinoceros* determinou a interseção entre os trechos de superfície, bastou mover os trechos e as interseções entre os mesmos se faziam em tempo real, atingida a posição desejada aparavam-se as abas via comando *trim*. Destacamos que se essa operação de interseção fosse realizada em PI2D, seja nos ambientes 1 ou 2, seria muito trabalhosa.

Notou-se, nesse exercício, a facilidade que algumas ferramentas CAD oferecem para realizar específicas operações em PC3D. Além da interseção entre os trechos, o *Rhinoceros* operou a planificação de todos eles com extrema facilidade e rapidez, utilizando-se o comando *unroll* houve a planificação instantânea. O *software* determinou também a interseção do pavilhão com o plano do piso, o que, para a confecção da maquete, facilitou a sua montagem.

Operações feitas no *Rhinoceros*, exportaram-se os resultados para o *AutoCAD*, onde, em tela do notebook, cada equipe elaborou três folhas virtuais em A4 (ver figura 85); em uma folha se localizou a representação gráfica do projeto, em 1/200, nas outras duas folhas estavam os trechos planificados e a base da maquete, com a interseção do pavilhão com o piso marcada, ambas em 1/100.

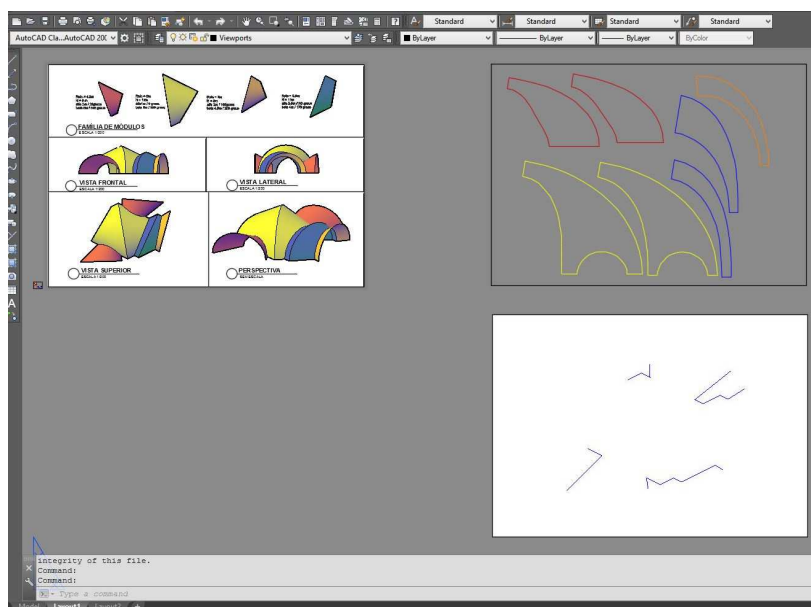


Figura 85: três folhas A4 virtuais em AutoCAD

Fonte: o autor, 2016

Fim da aula 06, as três pranchas A4 deveriam ser impressas em casa, e trazidas na aula seguinte, quando ocorreria a montagem da maquete.

A **aula 07** foi ministrada no LAMO3D, cada equipe trouxe as suas três folhas impressas em papel canson A4 e material para montagem das maquetes.

Uma das folhas A4 continha a representação gráfica do projeto (figura 86); foi elaborada a partir do modelo 3D, mesmo quando resultou em desenhos análogos aos obtidos por PI2D, realizando procedimentos semelhantes aos já relatados quando da elaboração dos desenhos relativos às figuras 79 e 80.

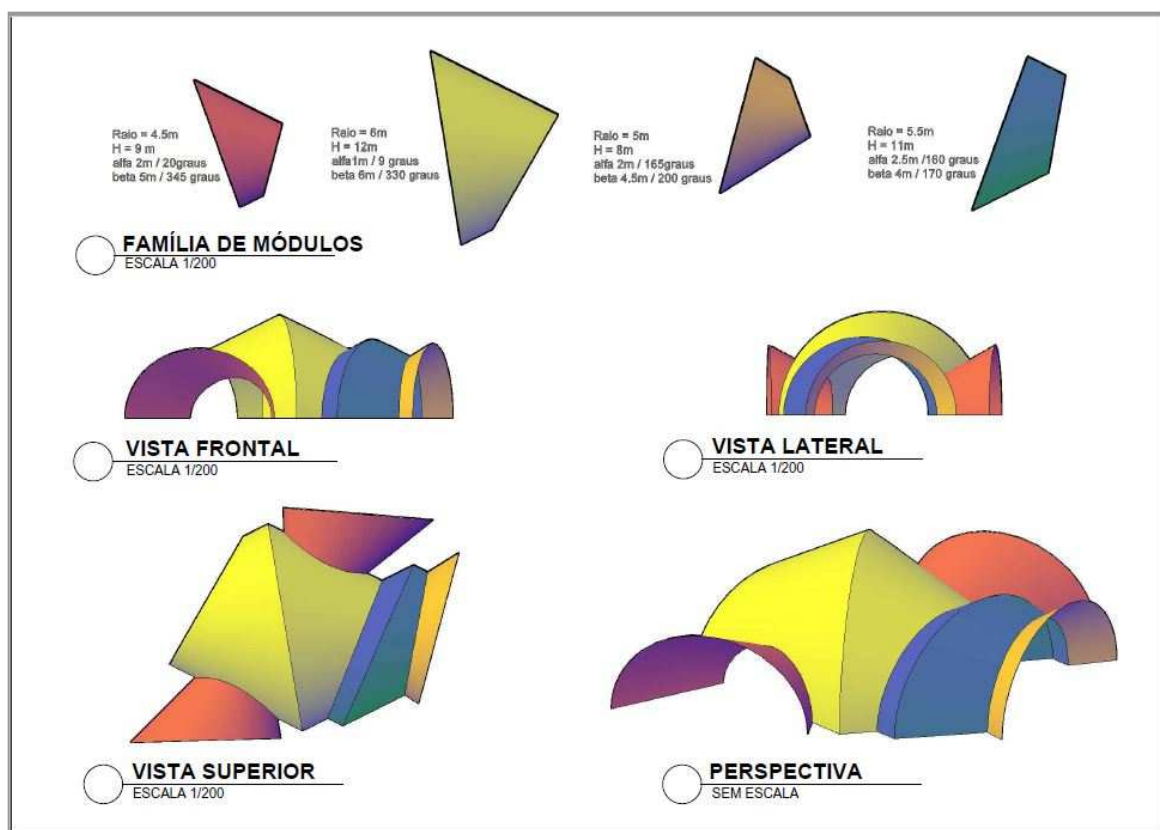
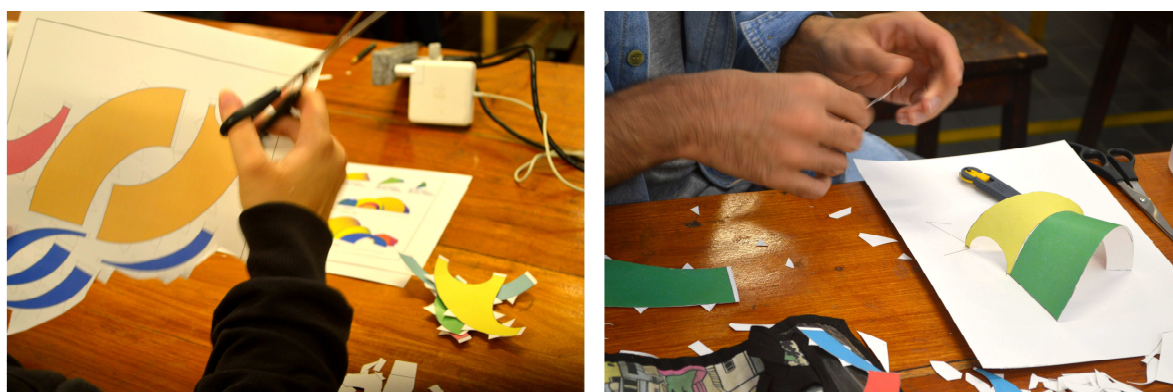


Figura 86: representação gráfica em A4 de um dos pavilhões

Fonte: o autor, 2016

Com as representações gráficas já prontas, as equipes fizeram o corte manual e a montagem de suas maquetes, na escala 1/100 (figuras 87 e 88).



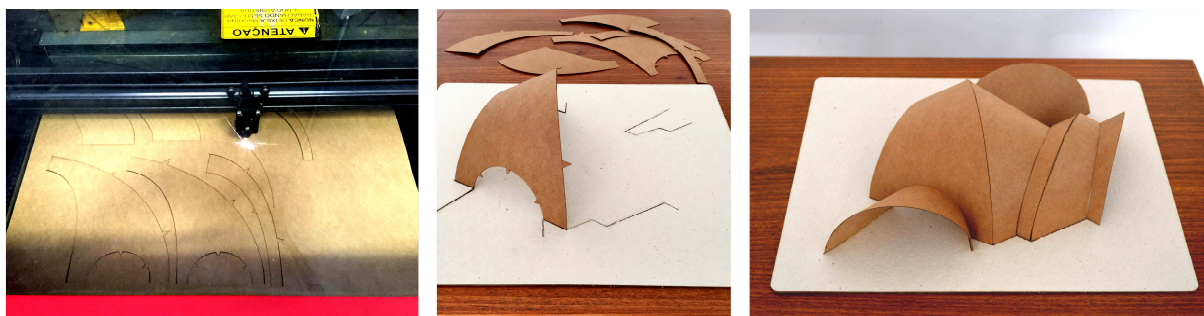
Figuras 87 e 88: maquete em 1/100 - corte manual das peças e montagem

Fonte: o autor, 2016

Antes da metade da aula 07, as equipes já dispunham das maquetes em 1/100 prontas, assim como da representação gráfica de seus pavilhões em 1/200. Na mesma aula houve uma discussão de como cada um dos pavilhões poderia ser construído, como protótipo 1:1, por fabricação digital.

Na ocasião, os alunos dispunham de um pavilhão semelhante em forma e tamanho, edificado na entrada da própria FAU-UFRJ (ver figura 50), produto de um *workshop* realizado meses antes, esta construção em 1:1 foi dada como exemplo de *prototipagem digital*. Nela, placas de compensado foram cortadas em grandes fresadoras CNC, o mesmo processo poderia ser repetido para se construir cada um dos pavilhões projetados pelas equipes em aula, utilizando inclusive os mesmos arquivos digitais como base, arquivos que os alunos já dispunham para a impressão das peças planificadas da maquete, com algumas adaptações.

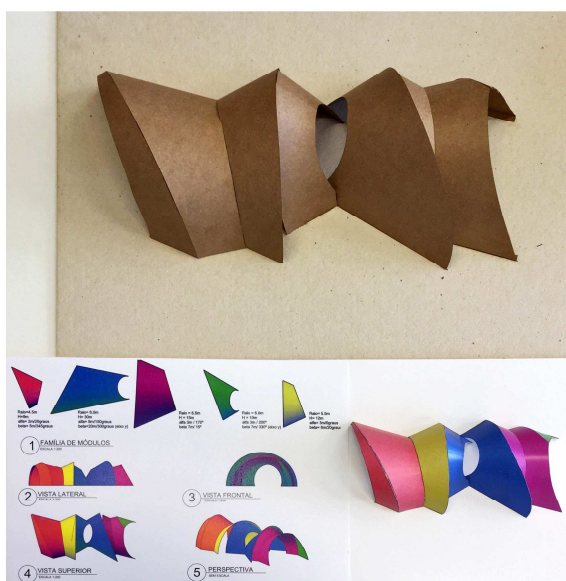
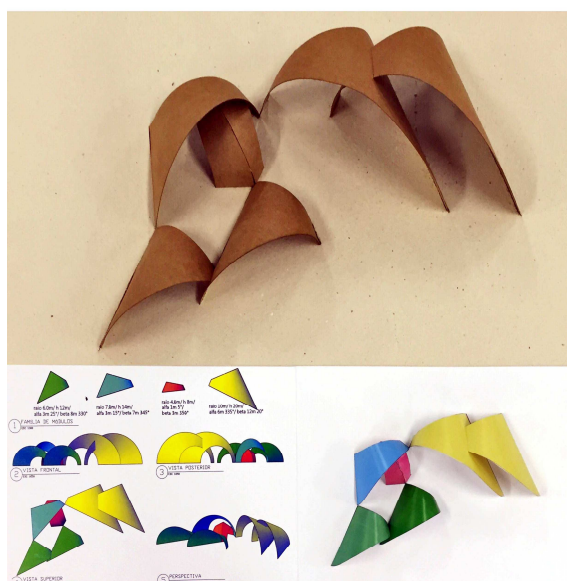
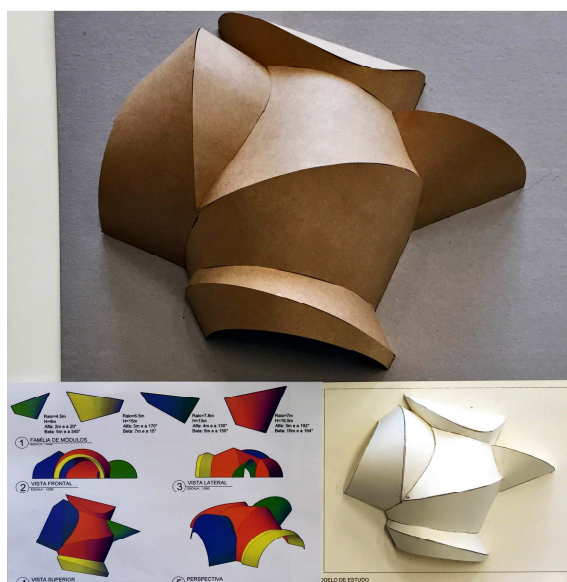
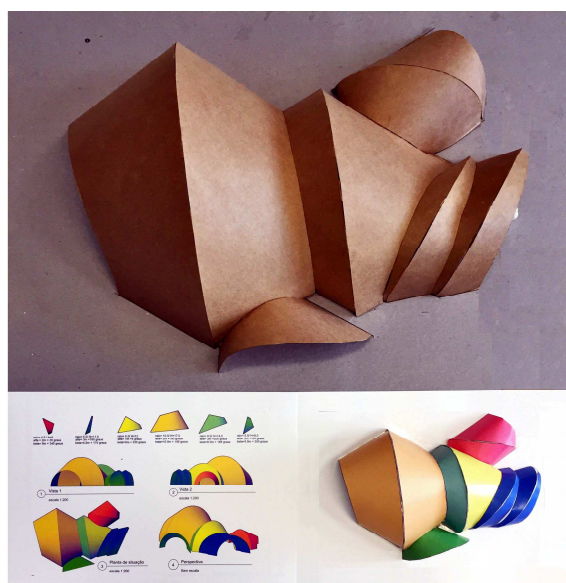
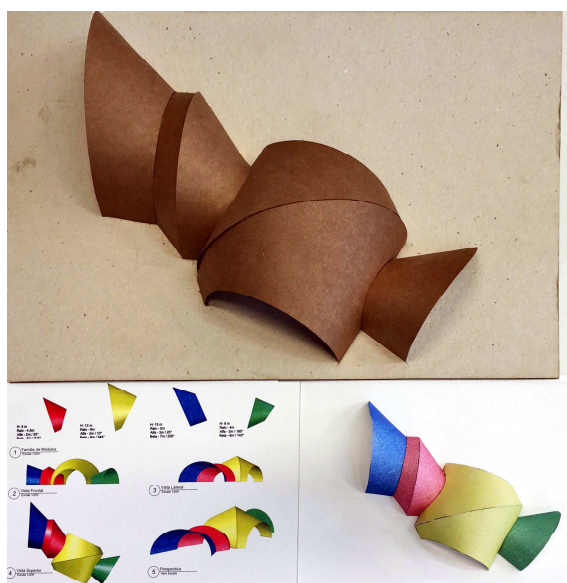
Como não se dispunha de recursos financeiros, de uma fresadora CNC, de chapas de compensado, de mão de obra, espaço e tempo, mas se dispunha de uma cortadora a laser no LAMO3D, foi indicado a cada equipe que construísse uma outra maquete, desta vez por corte a *laser* (figuras 89, 90 e 91) e na escala 1/50. Ela foi elaborada em papéis *kraft* e *paraná*, a partir dos mesmos arquivos digitais que haviam utilizado na confecção da maquete anterior em 1/100; assim exercitaríamos uma aproximação ao processo de se construir um protótipo 1:1, mesmo que esta construção em 1:1 não fosse, efetivamente, vivenciada pelos alunos, acabamos por inserir uma nova etapa de fabricação ao exercício.



Figuras 89, 90 e 91: maquete em 1/50 – corte a laser, montagem e finalização

Fonte: o autor, 2016

A seguir, podemos observar alguns dos trabalhos das equipes finalizados, com seus produtos físicos elaborados, a saber: representação gráfica (1/200) em folha A4, maquete cortada à mão (1/100) e maquete cortada a *laser* (1/50). Eles podem ser vistos nas figuras 92 a 97:



Figuras 92 a 97: seis pavilhões – equipes A, B, C, D, E, F
Fonte: o autor, 2016

Na **aula 08**, alguns poucos alunos, por terem se atrasado, ainda concluíam o trabalho, colando as últimas peças da maquete; neste dia chegamos à metade do curso da disciplina *Geometria Descritiva Aplicada à Arquitetura*, e à metade do experimento. Aula em que foi aberta uma discussão para recapitularmos o que se tinha feito até este ponto, metade do curso, destacando experiências vividas nessa trajetória, que seriam levadas à metade seguinte do curso.

Muito do que foi observado pelo pesquisador foi corroborado pelos comentários dos alunos, dentre eles: que as experiências vividas foram satisfatoriamente compreendidas, que operaram a forma por diversas ferramentas e em ambientes diversos, que foram capazes de relacionar a experiência que já tinham em operar a forma, em geometria descritiva e em ambiente 1, com as novas situações vividas em aula.

Neste mesmo ponto, enquanto experimento, os indivíduos de nossa amostra já haviam sido expostos aos quatro ambientes de se operar a forma, tendo sido submetidos a uma sequência de exposição aos ambientes 1, 2, 3 e 4; e, já haviam utilizados todas as ferramentas CAD do universo do experimento.

Os indivíduos de nossa amostra, a este ponto, também já haviam realizado algumas operações que até então não lhes eram usuais, como a elaboração de algoritmos por programação visual e a parametrização na geração e manipulação da forma, assim como lhes foram apresentados a prototipagem digital e o procedimento de *file-to-factory*. Seguimos, agora, para a segunda parte do curso, onde mais operações que lhes seriam novidade foram adicionadas ao experimento.

Encerrada estava a aula 08, assim como a primeira parte do curso e do experimento.

3.2 OBJETO 2

Na segunda parte do experimento, elegemos outro objeto arquitetônico, ou *Objeto 2*; exploramos alguns aspectos que as ferramentas CAD contemporâneas podem particularmente promover, como a possibilidade de já partirmos da modelagem 3D, sem a construção prévia de projeções 2D; também nos dedicamos a realizar operações sobre a forma que nos pareceram ser estimuladas por essas ferramentas, mas que ainda não tinham sido executadas na primeira parte do experimento, como a *otimização geométrica* e a *panelização*.

Buscamos, sempre que possível, estimular os alunos a relacionar estas operações com a maneira de se operar a forma característica da geometria descritiva e com processos PI2D, seja em *épura* ou em representações 2D do objeto em plantas ou vistas. Foi um percurso inverso ao realizado na primeira parte do experimento, indo agora do 3D para o 2D.

A segunda parte do experimento se realizou durante as sete últimas aulas, de um total de quinze, do curso de Geometria Descritiva Aplicada à Arquitetura (GDA), exibidas no quadro 5:

AULA	DIA		CONTEÚDO DA AULA
09	Qua	01 jun	Objeto 2.0 / Planificação de superfícies de revolução reversas por aproximação e discretização / elaboração de estratégias comuns a diversas superfícies / divisão das superfícies por equipe.
10	Qua	08	Objeto 2.0 / maquete colaborativa / preparação da planificação das peças das cúpulas.
11	Qua	15	Local: LAMO / Objeto 2.0: corte a laser / finalizar a maquete / comparação dos resultados e discussão.
12	Qua	22	Objeto 2.1 como variação do objeto 2.0, cada equipe elabora a sua cúpula, elaboração de algoritmo em Grasshopper para solucionar qualquer cúpula.
13	Qua	29	Objeto 2.1 / estudos formais para adequação da cúpula a partir da curva diretriz e alteração de parâmetros em seu algoritmo / elaboração da parte gráfica do trabalho.
14	Qua	06 jul	Objeto 2.1 / elaboração da planificação escolhendo-se uma dentre as três soluções apresentadas pelo algoritmo / Finalização da parte gráfica do trabalho.
15	Qua	13	Local: LAMO / Objeto 2.1: corte a laser / finalizar a maquete / comparação dos resultados e discussão.

Quadro 5: aulas 09 a 15 - Objeto 2 e variações.

Fonte: o autor, 2016

A **aula 09** abriu a segunda parte do experimento, elegemos um outro objeto geométrico, ou *Objeto 2*, que remeteu ao objeto arquitetônico *cúpula*. Em nosso exercício tivemos mais de uma cúpula, para conformá-las foram eleitas superfícies geradas por revolução algumas curvas, em torno de um eixo. As curvas eleitas foram de três tipos: semicircunferência, semi-elipse e trecho de parábola, que geraram quatro trechos das seguintes superfícies: *esférica*, *elipsoide de revolução*,

parabolóide de revolução e toro circular. Ressaltamos que o toro circular foi também gerado por uma semicircunferência (ver figura 98).

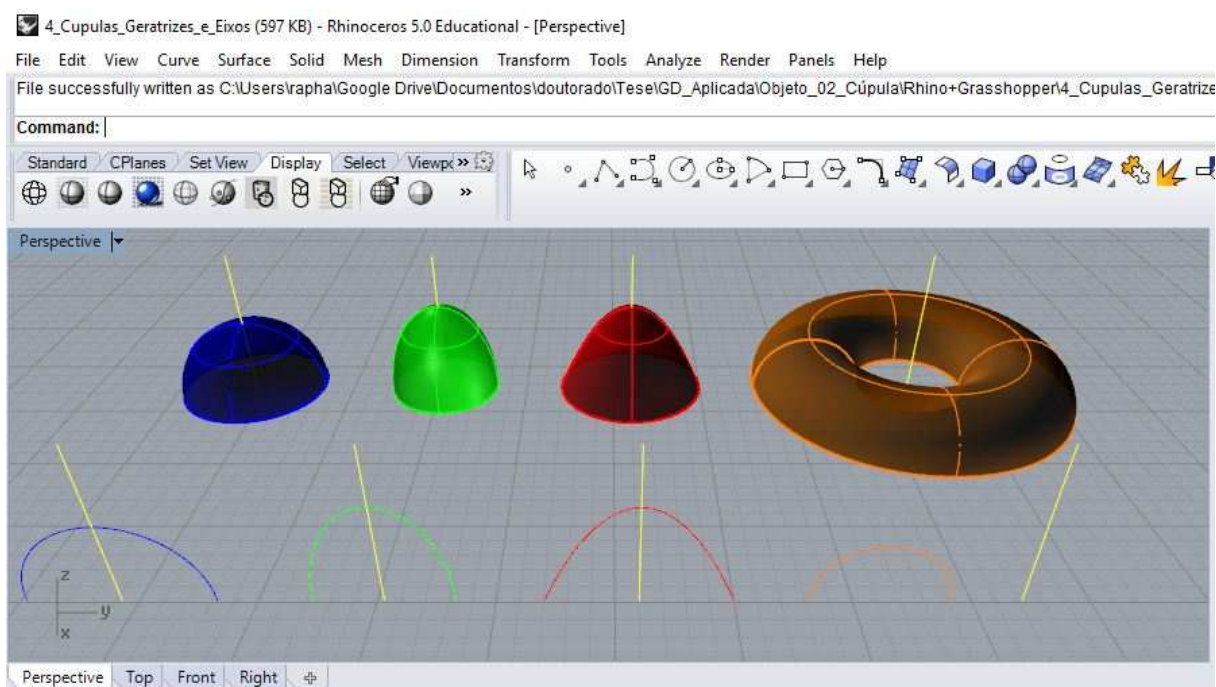


Figura 98: eixos, curvas e superfícies das cúpulas

Fonte: o autor, 2016

Começou-se por modelar as superfícies em ambiente 3, processo PC3D, no *Rhinoceros*, a partir de eixos e curvas já dados. Estas curvas e superfícies eram conhecidas dos indivíduos da amostra, pois todos haviam cursado previamente a disciplina *Geometria Descritiva 2* na FAU-UFRJ, que em seu Plano de Curso (ver anexo E) reserva 3 horas-aula para o estudo destas curvas e 12 para o estudo destas superfícies, compondo 15 horas-aula; estudos realizados em ambiente 1, em processo PI2D com ferramentas analógicas, com a interface da *épura*; nestas horas inclui-se o estudo de seções nestas superfícies, às quais se adicionam 9 horas-aulas para o estudo de interseções entre estas mesmas superfícies, totalizando 24 horas-aula.

Baseados nesses estudos anteriores, os alunos puderam identificar as superfícies como reversas, logo, não planificáveis, por não possuírem um único plano tangente ao longo de uma geratriz³⁸. Chamamos a atenção para o fato do *Rhinoceros* oferecer um comando de fácil operação, que identifica as curvaturas locais da superfície, e as exibe em tela instantaneamente³⁹, utilizando o conceito de

³⁸ Rever figura 21.

³⁹ Rever figura 23.

curvatura gaussiana nessa visualização, que traduz em cores a curvatura de cada ponto. A despeito dessa facilidade oferecida, pela ferramenta CAD em analisar curvaturas, ela não foi utilizada para diagnosticar a superfície como reversa, mas o professor encontrou aqui uma oportunidade de exibir o recurso, e de falar brevemente sobre dupla curvatura em uma superfície e de suas propriedades locais.

Aos alunos, foi proposta a construção destas cúpulas, a de maior altura com 5 metros e a de maior diâmetro com 18 metros; na falta de meios materiais para este fim, a construção seria substituída pela confecção de maquetes em 1/50. Certamente confeccionar uma maquete não é o mesmo que se construir uma cúpula, mas analogias como essa proporcionaram explorar um problema arquitetônico de caráter construtivo, que pudesse ser solucionado com o conhecimento geométrico.

Nesta *materialização* da superfície, o material da cúpula seria metálico, em chapas dobráveis e curváveis; o da maquete, o papel kraft, também teria estas propriedades. Evitou-se analogias a materiais como o vidro, que, a frio, não admitiria ser dobrado ou curvado. As chapas metálicas e o papel kraft, mesmo submetidos a curvaturas simples ou a dobraduras, não permitiriam construir sequer uma das quatro superfícies. Foi então realizado um estudo em *Rhinoceros*, com a turma, que chegou a três soluções, que se aproximavam das superfícies ideais (ver figura 99).

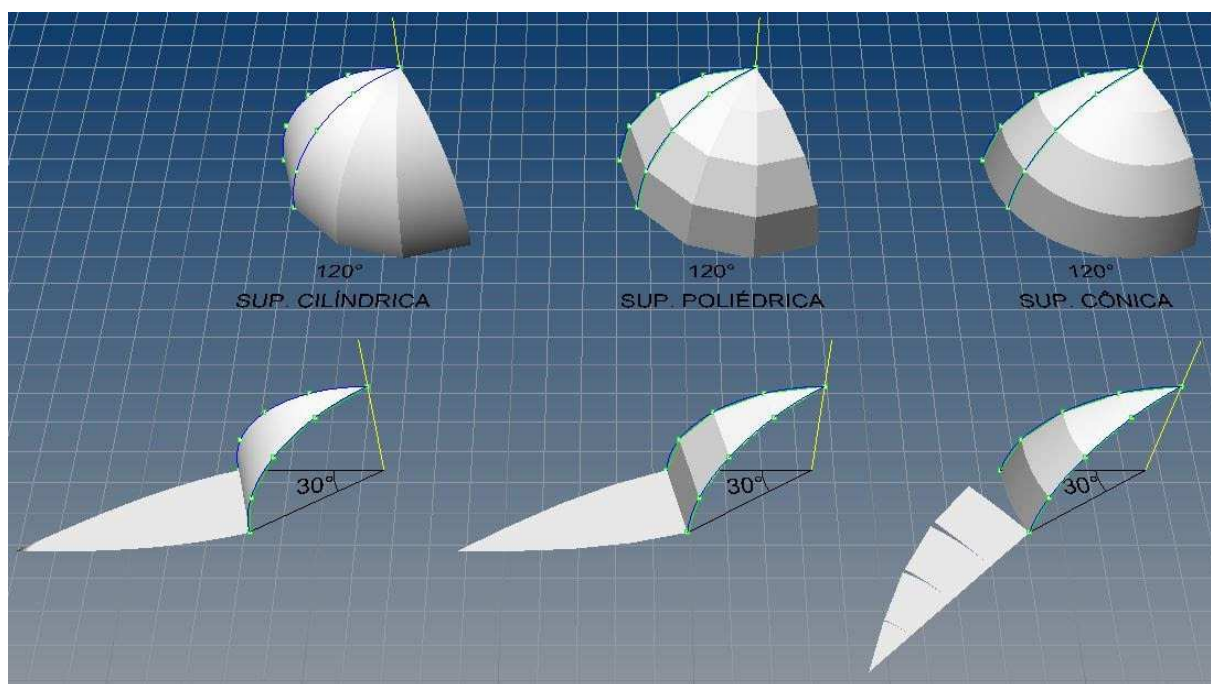


Figura 99: discretização da superfície esférica – em cilíndrica, poliédrica e cônica

Fonte: o autor, 2016

O estudo, aplicado à semiesfera e posteriormente transposto às demais superfícies, permitiria construir tanto as cúpulas com chapas metálicas como as maquetes em papel kraft, permitiria chegar à planificação e obter uma forma aproximada da ideal. Durante esse estudo, foram apresentadas aos alunos três operações que se mostram recorrentes em ambiente digital, embora dele não sejam exclusivas: a *discretização*⁴⁰, a *otimização*⁴¹ geométrica e a *panelização*⁴².

A cúpula esférica foi dividida em três partes de 120° (figura 99), que foram *discretizadas* em três tipos de superfícies: a cilíndrica, a poliédrica e a cônica; no primeiro caso, cilíndrica; no segundo caso, poliédrica prismática; e no terceiro caso, cônica de revolução. Na parte de baixo da mesma figura exibem-se trechos relativos a 30° das superfícies, com os estudos de *panelização* e de *planificação*.

As três superfícies, obtidas por discretização da cúpula, foram estudadas pelos indivíduos da amostra quando alunos da disciplina *Geometria Descritiva 2*, na FAU-UFRJ, que em seu Plano de Curso (ver anexo E) reserva a elas 12 horas-aula. Ao somarmos essas horas com as 24 horas-aula relativas ao estudo das superfícies ideais: esférica, elipsoide, parabolóide e toro, o exercício de cúpulas contou com o apoio total de 36 horas-aula precedentes de geometria descritiva.

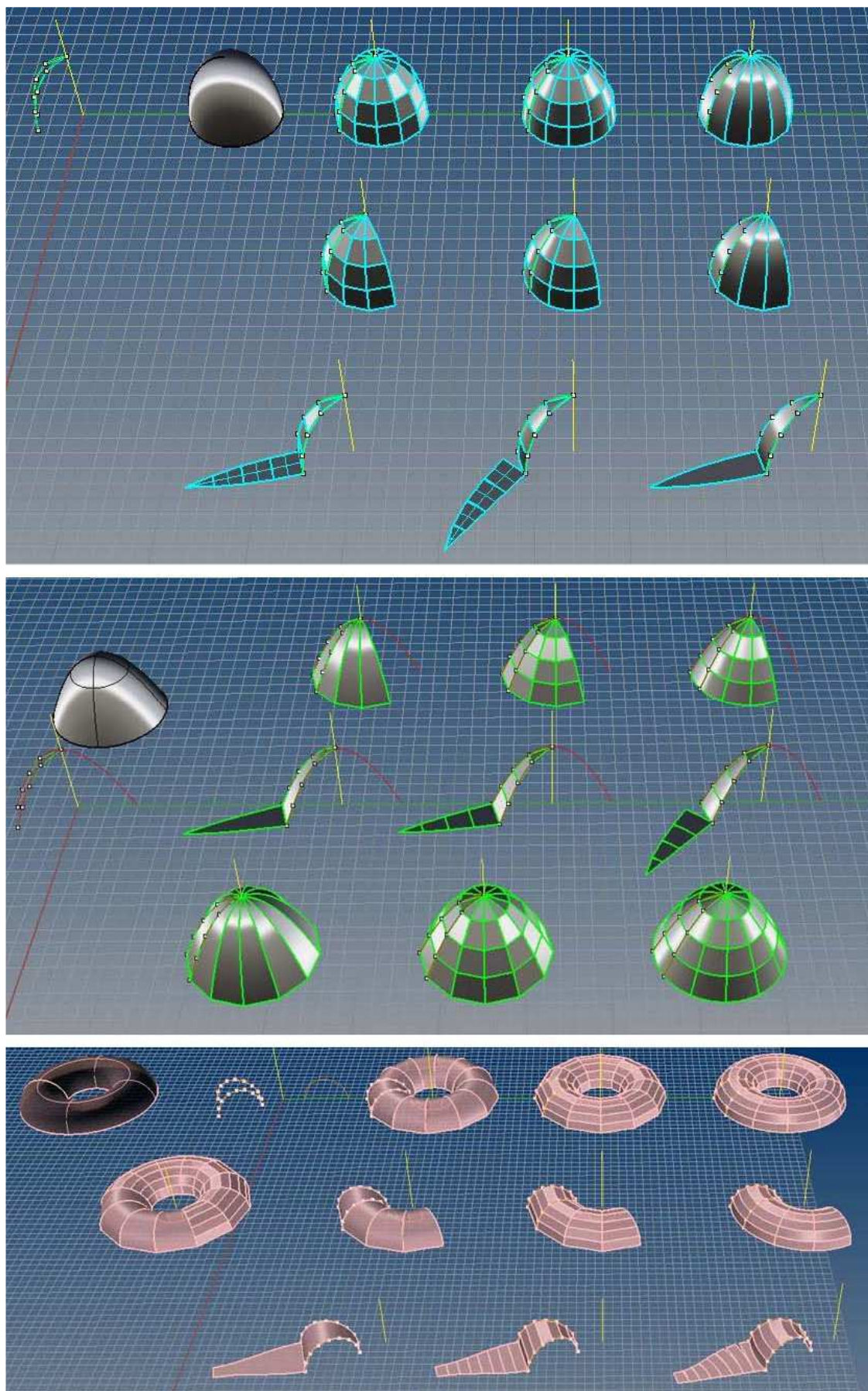
Os meridianos da superfície, que são arcos de circunferência, se mantiveram inalterados na primeira situação, já, nas duas seguintes, precisaram ser discretizados e convertidos em linhas poligonais de quatro lados iguais. Quanto aos paralelos da esfera, estes se mantiveram íntegros no exemplo da direita, mas precisaram ser discretizados na solução ao centro e à esquerda, onde foram convertidos também em linhas poligonais.

A seguir, a turma foi dividida em quatro grupos, cada um responsável por construir uma das quatro cúpulas da figura 98. Os próprios alunos se encarregaram de transpor as operações sobre a forma, realizadas na esfera, às outras três superfícies, no mesmo ambiente 3 (ver figuras 100, 101 e 102), fim da aula 09.

⁴⁰ Rever figura 24.

⁴¹ Rever figura 25.

⁴² Rever figura 26.

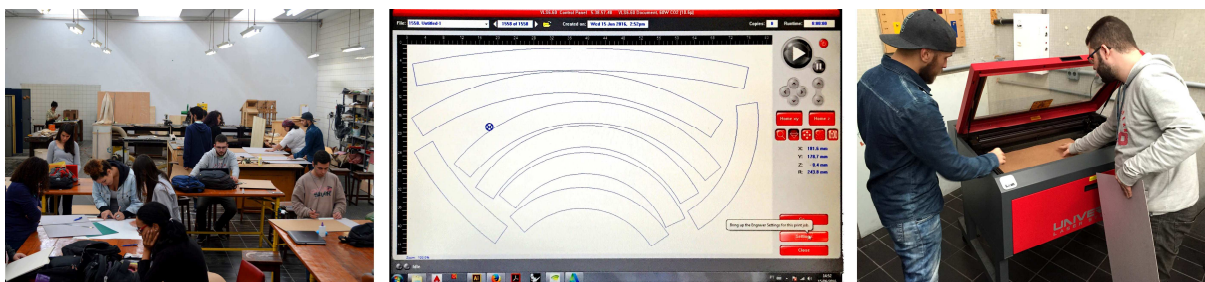


Figuras 100, 101 e 102: discretização do elipsoide / parabolóide / toro – com planificação
 Fonte: o autor, 2016

No início da **aula 10**, retomou-se o exercício. Cada grupo construiu a sua respectiva cúpula, de maneira colaborativa, para isto cada grupo se subdividiu em três duplas, cada dupla se dedicou a construir uma porção de 120° da maquete em 1/50. Cada porção trouxe uma das discretizações, que, postas juntas, compuseram os 360° de cúpula, numa tríade de soluções de discretização.

Na mesma aula os alunos prepararam os arquivos digitais, elaborando as peças digitalizadas a serem levadas a corte a *laser* no LAMO3D, o que seria feito na aula imediatamente seguinte, a aula 11. Nesta preparação, buscaram estratégias de montagem das maquetes, com a criação de abas de colagem e a previsão de peças para estruturar a maquete, elaboradas com um material mais rígido que o kraft, como o papel paraná. As peças planificadas, seja da superfície ou da estrutura da maquete, foram elaboradas em ambiente 3, no Rhinoceros; ao fim da aula estavam todas já definidas em arquivo digital, prontas ao corte a *laser*. Fim da aula 10.

A **aula 11** foi a segunda das três aulas do curso ministrada no LAMO3D (figura 103). Os arquivos digitais, elaborados na aula 10, já estavam adequados à exportação ao software da cortadora a *laser* (figura 104). Ora folhas de kraft, ora de paraná, foram posicionadas pelos alunos na cortadora (figura 105), com as peças obtidas com o corte a laser procedeu-se, na mesma aula, à montagem da maquete.

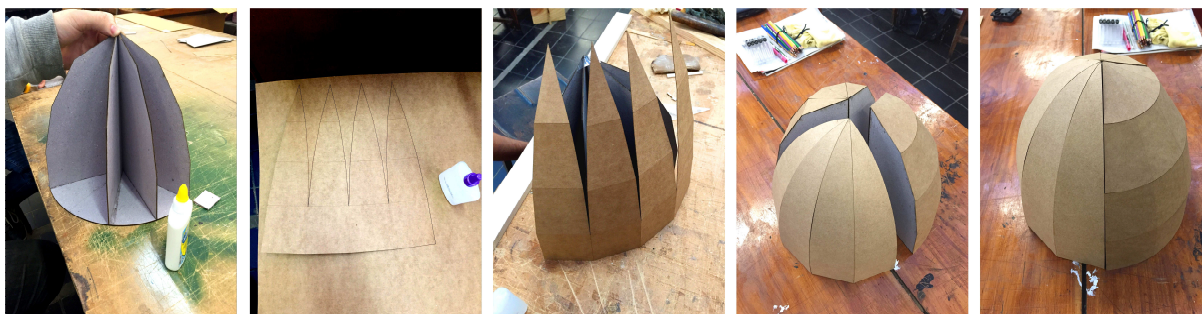


Figuras 103, 104 e 105: LAMO3D / interface do software da cortadora a *laser* / cortadora a *laser*

Fonte: o autor, 2016

Uma das características desse exercício foi a de não ter havido a elaboração de uma representação gráfica bidimensional a ser impressa, que simulasse plantas e vistas, que se configurasse como um desenho de apresentação das cúpulas; do ambiente 3, no *Rhinoceros*, os arquivos digitais passaram direto à fabricação, fazendo com que os alunos vivenciassem o princípio *file-to-factory*, possível em ambiente digital.

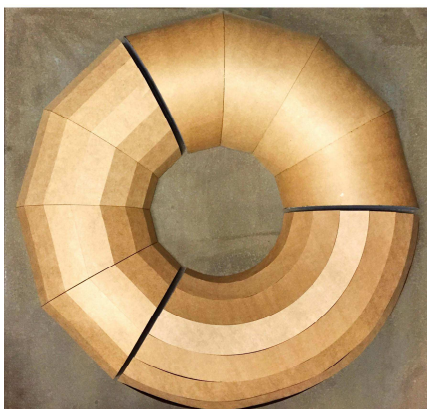
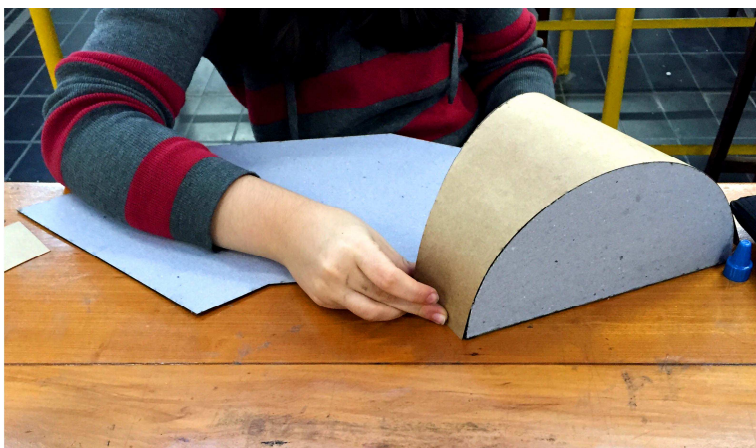
Iniciou-se a montagem das maquetes, nas figuras 106, 107 e 108, temos a montagem da porção de 120° , da cúpula do elipsoide de revolução, relativa à discretização segundo uma superfície poliédrica. Na figura 109 e 110, vemos as três porções de 120° finalizadas, respectivamente separadas e juntas.



Figuras 106 a 110: montagem da maquete 1/50 da cúpula em elipsoide de revolução - peças de apoio / peças planificadas / colagem / três superfícies / união

Fonte: o autor, 2016

O mesmo ocorreu às outras cúpulas, como a do toro (figuras 111 a 114).



Figuras 111, 112, 113 e 114: montagem em 1/50 do toro com 3 superfícies em sentido horário – cônica / cilíndrica / poliédrica / união das superfícies.

Fonte: o autor, 2016

As quatro cúpulas foram finalizadas, com as três partes de 120° apenas aproximadas e não coladas, para facilitar o posterior manuseio e a observação das partes em separado pelos alunos, estava concluído o exercício com o *Objeto 2* (figura 115). Ao fim da aula foi realizada uma breve discussão, comparando os resultados alcançados e relembrando as operações realizadas, algumas novas aos alunos, como a *discretização*, *panelização* e *otimização* geométrica das superfícies.

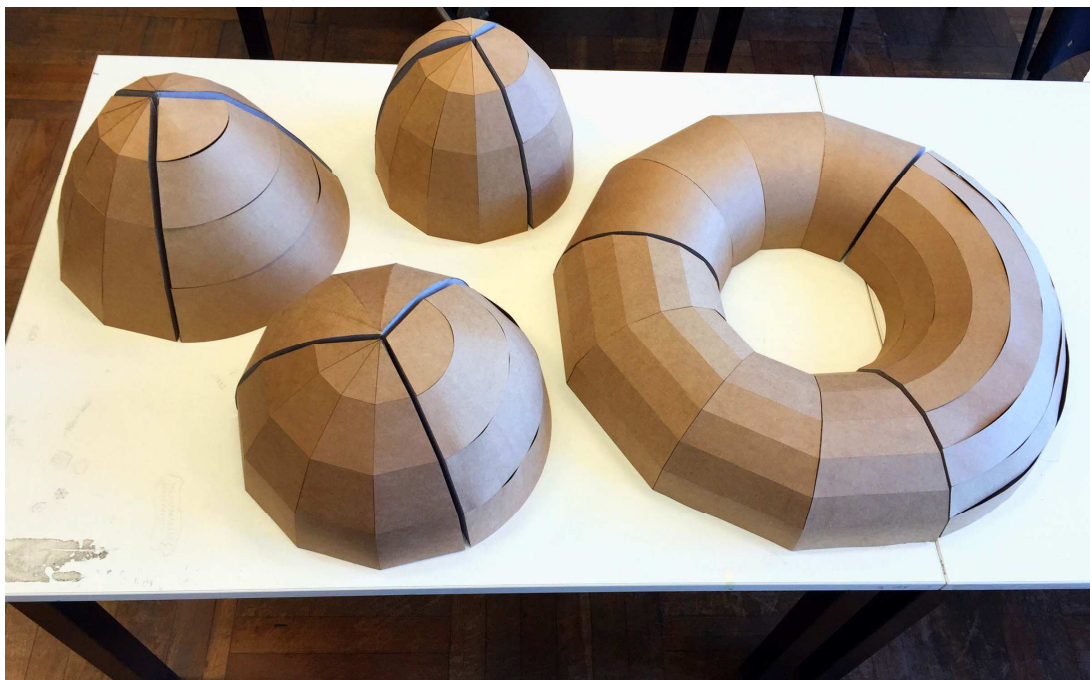


Figura 115: maquetes das cúpulas em 1/50 finalizadas
Fonte: o autor, 2016

A **aula 12** se inicia em sala de aula regular, lá as maquetes foram reagrupadas segundo as superfícies obtidas na discretização (ver figura 116).

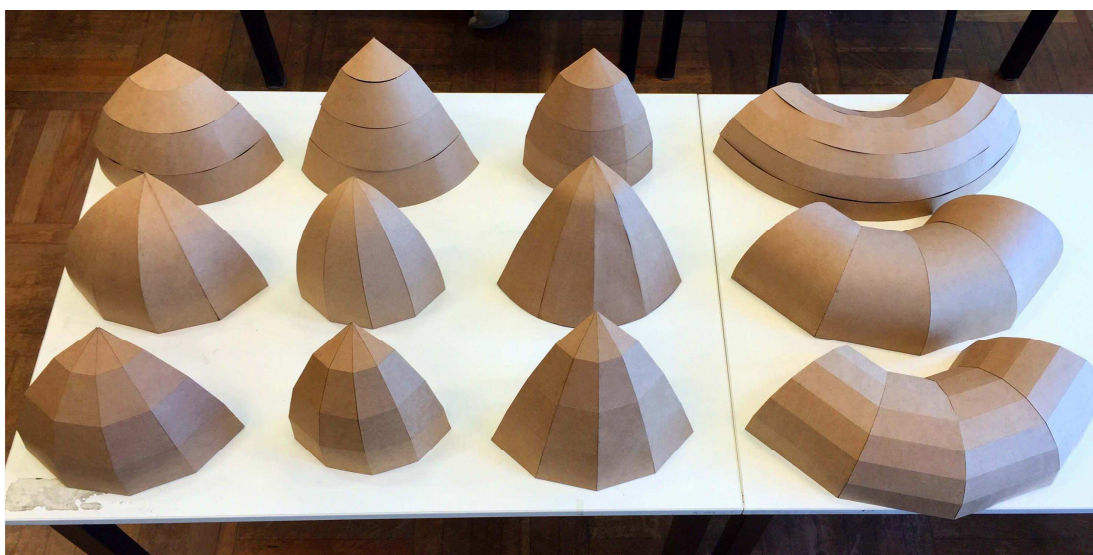


Figura 116: identificação de padrões nas maquetes
Fonte: o autor, 2016

Foi pedido aos alunos que observassem os trechos de cúpula assim dispostos, que neles identificassem padrões, em especial o que poderia haver em comum nos trechos das cúpulas que foram discretizadas segundo o mesmo tipo de superfície, dispostas de frente a trás da figura 116 como: superfícies poliédricas, superfícies cilíndricas e superfícies cônicas.

A seguir, a turma identificou regras geométricas que levariam à geração destas formas, ordenaram estas regras geométricas sequencialmente, uma definição geométrica dos passos a serem seguidos; definição inicialmente expressa por palavras, foi, em seguida, transposta a um algoritmo via programação visual.

Os alunos já haviam aplicado as tais regras geométricas em modelagem digital em ambiente 3, com o *Rhinoceros*, agora lhes seria proposto que utilizassem o ambiente 4, com programação visual, aplicando essas mesmas regras via *Grasshopper*, compondo este algoritmo.

Para sermos precisos, foram elaborados 4 algoritmos, expressos pelos 4 retângulos maiores em lilás na figura 117; o primeiro geraria a forma *ideal* da cúpula, porém seria uma superfície reversa, o segundo levaria a uma superfície *cilíndrica*, o terceiro à poliédrica, o quarto a uma superfície cônica de revolução.

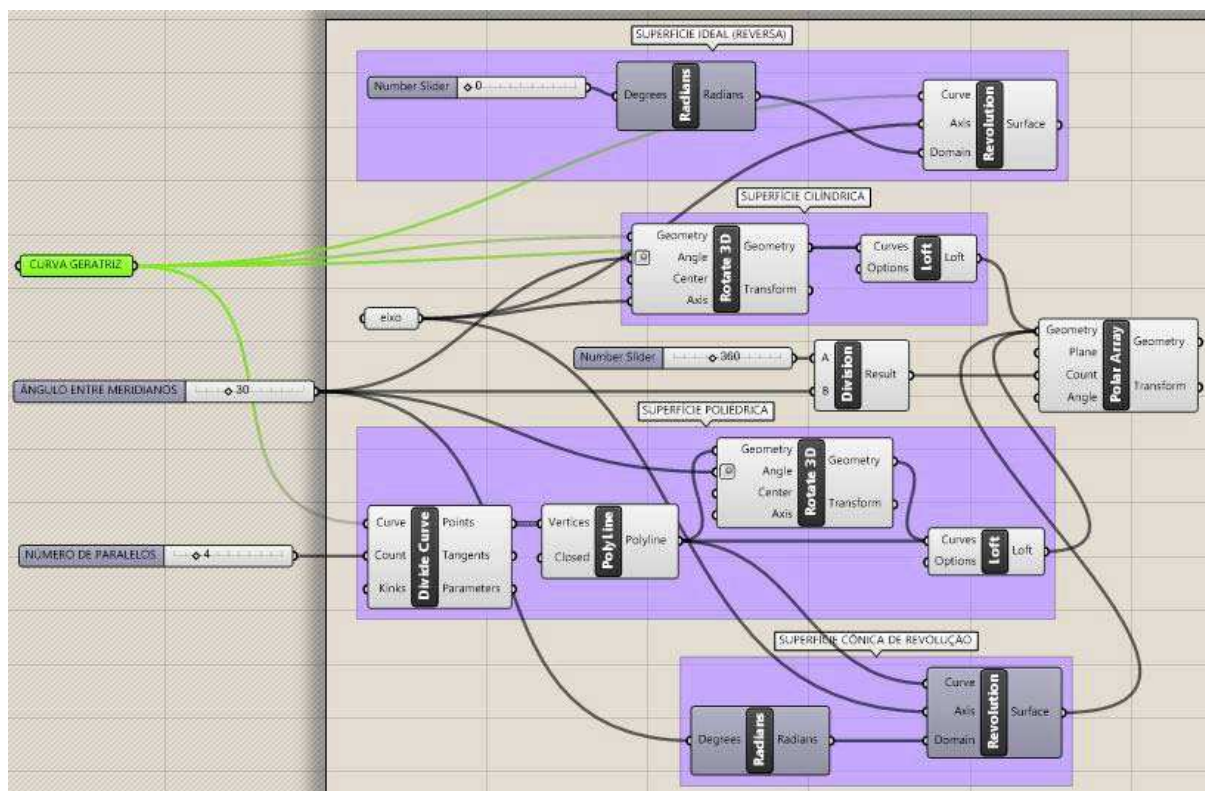


Figura 117: algoritmo da cúpula gerando 4 superfícies – ideal, poliédrica, cilíndrica e cônica

Fonte: o autor, 2016

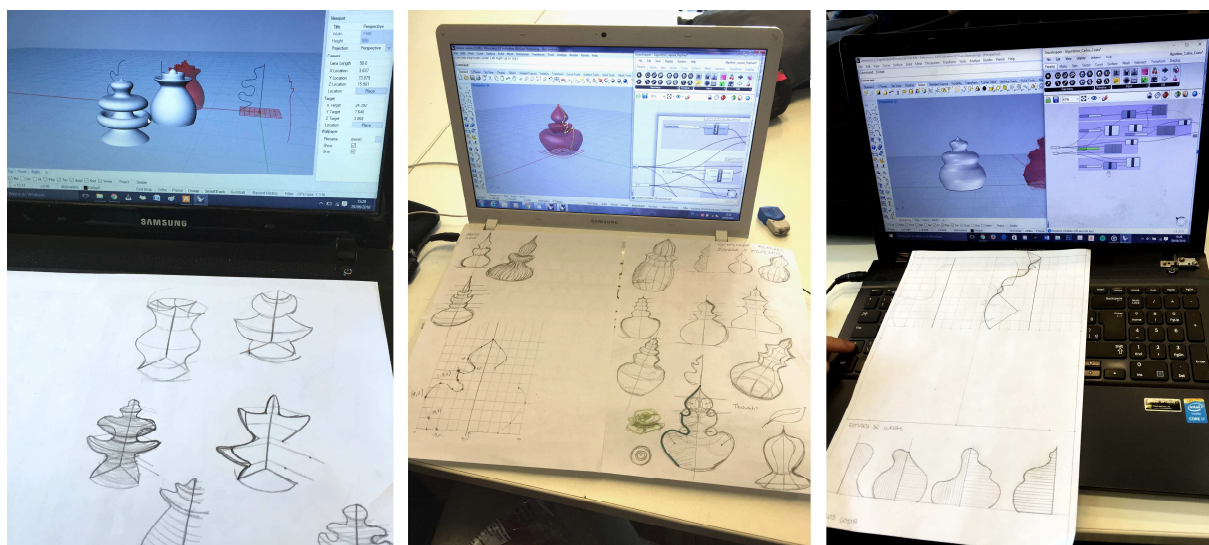
À esquerda, na mesma figura 117, há um pequeno retângulo verde, a ele se associou a curva a gerar a superfície pretendida, ou curva geratriz; com a associação à parábola se geraria o parabolóide de revolução, associando-o à elipse teríamos o elipsoide de revolução, daí por diante para as demais superfícies.

Os alunos testaram esta programação visual, selecionando a curva pretendida para, a seguir, ativar um a um os quatro grandes retângulos lilases, os quatro algoritmos geraram tanto a superfície ideal do primeiro retângulo, como as demais três superfícies discretizadas, que permitiam a planificação.

Todo o processo de geração e discretização das cúpulas estava descrito nos algoritmos, bastava selecionar a curva e o tipo de geração ou discretização, que tudo se fazia instantaneamente, e, em ambiente 4, a solução era exibida em tela, no *Rhinoceros*. Todo o trabalho de geração das cúpulas e de suas discretizações, exibidos nas figuras 99, 100, 101 e 102, antes realizado em ambiente 3, passou a ser realizado com apenas uma seleção e um clique do mouse. Fim da aula 12.

A **aula 13** foi dedicada a que cada aluno projetasse a sua própria cúpula, começando por definir uma curva diretriz, que, por revolução em torno de um eixo, geraria a forma desejada, produzindo assim o *Objeto 2.1*, semelhante ao *Objeto 2*.

Os trabalhos se iniciaram por croquis à mão, observados nas folhas de papel, na parte de baixo das figuras 118, 119 e 120, só depois os desenhos foram digitalizados, como observamos na parte superior das mesmas figuras.



Figuras 118, 119 e 120: curva geratriz e superfície ideal - equipes A, B e C

Fonte: o autor, 2016

Inicialmente, cada aluno fez seu estudo, posteriormente lhes foi indicado que fizessem o trabalho em dupla, para isso deveriam eleger uma única solução entre as estudadas, e com ela prosseguir no exercício.

Para a digitalização do *Objeto 2.1*, se definiram o eixo de revolução e uma curva diretriz plana, no *Rhinoceros*. Na maioria das curvas, os alunos optaram por soluções que mostravam *continuidade* em seu traçado, característica que algumas ferramentas digitais podem facilitar a se obter em curvas e superfícies⁴³, nesse momento houve a oportunidade de aplicar alguns desses procedimentos de *continuidade*, tanto em curvas como em superfícies.

A figura 121 mostra algumas das possibilidades de traçado que os alunos exploraram em aula, no *Rhinoceros*, com alguns de seus comandos, para que a *continuidade* ocorresse na curva; à esquerda da figura 121, uma solução usual em desenho analógico, definindo os centros de curvatura de arcos de circunferência. Dentre os exemplos, o que utiliza o comando do *Rhinoceros* “*through points*” foi a solução preferida pelos alunos, permitia mover os pontos e a curva se conformava adaptando-se a esse movimento, sem perder a continuidade.

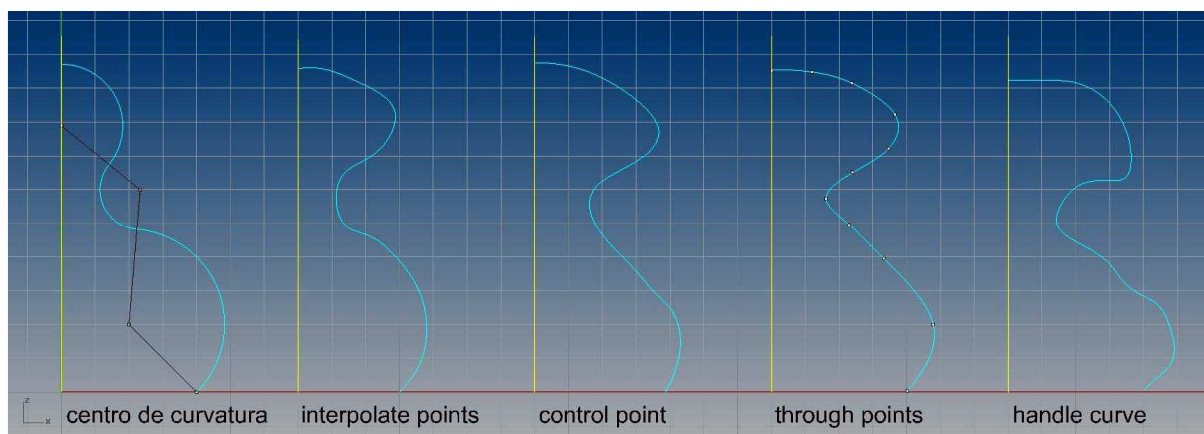


Figura 121: digitalização da curva geratriz da cúpula

Fonte: o autor, 2016

Digitalizada a curva no *Rhinoceros*, propôs-se que as cúpulas derivadas das curvas, de todos os alunos, fossem construídas, não em escala 1:1, mas na escala 1/50, tal como se fez no exercício anterior. As superfícies ideais, geradas nesse novo exercício, reversas tal como no exercício precedente, deveriam ser também construídas em modelo reduzido, recorrendo-se à *discretização*.

⁴³ Rever figuras 17, 18, 19 e 20.

Por que não utilizar os algoritmos já há pouco elaborados?

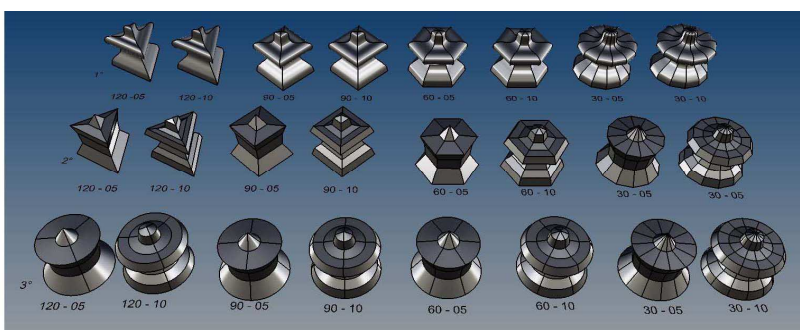
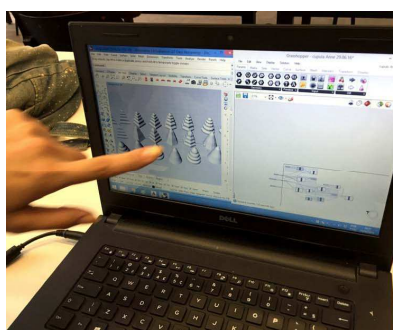
No ambiente 4, recuperaram-se os quatro algoritmos em *Grasshopper* expressos na figura 117. Cada equipe, em seu notebook, associou a sua curva geratriz ao retângulo verde à esquerda de figura 117; a seguir, ativaram alternadamente cada um dos grandes retângulos lilases, vistos à direita da mesma figura; cada um deles ordenou que se gerasse, a partir da mesma curva geratriz, as seguintes superfícies: ideal, cilíndrica, poliédrica e cônica de revolução.

Na mesma figura 117, à esquerda e logo abaixo do retângulo verde, dois retângulos em cinza aparecem, ambos são comando deslizantes, ou *sliders*, que aumentam ou diminuem o valor numérico do parâmetro ali inserido, produzindo variações na forma da cúpula; no primeiro deles o parâmetro é o ângulo entre os meridianos, o segundo parâmetro é o número de paralelos, ou número de parte nas quais dividiremos os meridianos.

Foi proposto aos alunos que gerassem, em ambiente 4 (ver figura 122), dada a facilidade e rapidez de se produzir variações na forma, vinte e quatro cúpulas discretizadas, alterando-se somente os parâmetros dos dois últimos retângulos, aos quais nos referimos no parágrafo anterior.

Para que as soluções não ficassem muito díspares, foi pedido a todos que organizassem essas variações gerando oito cúpulas com superfícies cilíndricas, oito com poliédricas e oito com cônicas (de cima a baixo da figura 123).

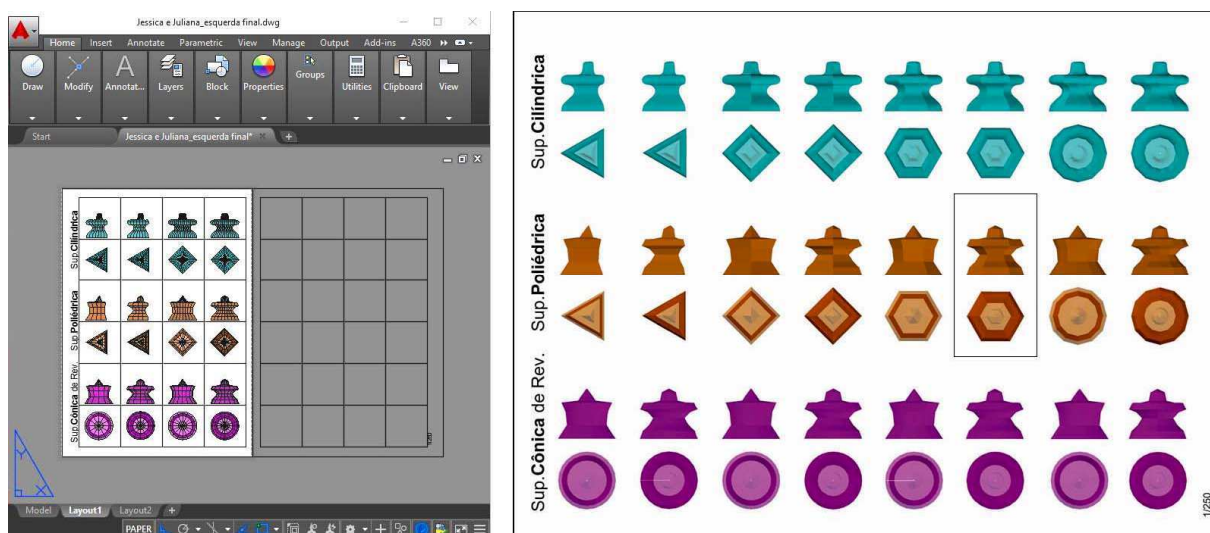
As duas filas da esquerda mostrariam soluções com 120° entre os meridianos, a seguir duas filas com 90° , duas com 60° , e, por último, à direita, duas filas com 30° . Entre as filas, alternavam-se uma com 5 paralelos e outra com 10 paralelos, 5 e 10, assim sucessivamente até o fim.



Figuras 122 e 123: discretização da cúpula em ambiente 4 / cúpulas em superfícies cilíndricas, poliédricas e cônicas

Fonte: o autor, 2016

Cada equipe produziu digitalmente 24 cúpulas, geradas em *Rhinoceros* pelos algoritmos em *Grasshopper*, obtendo como produto algo como o que se vê na figura 123. Propôs-se que as equipes organizassem as 24 cúpulas em uma representação gráfica, composta de vista frontal e superior, de cada uma delas, na escala 1/250; para tanto, exportou-se o arquivo em *Rhinoceros* para o *AutoCAD*, lá foram abertas 48 janelas em uma folha A3 virtual (ver figura 124).



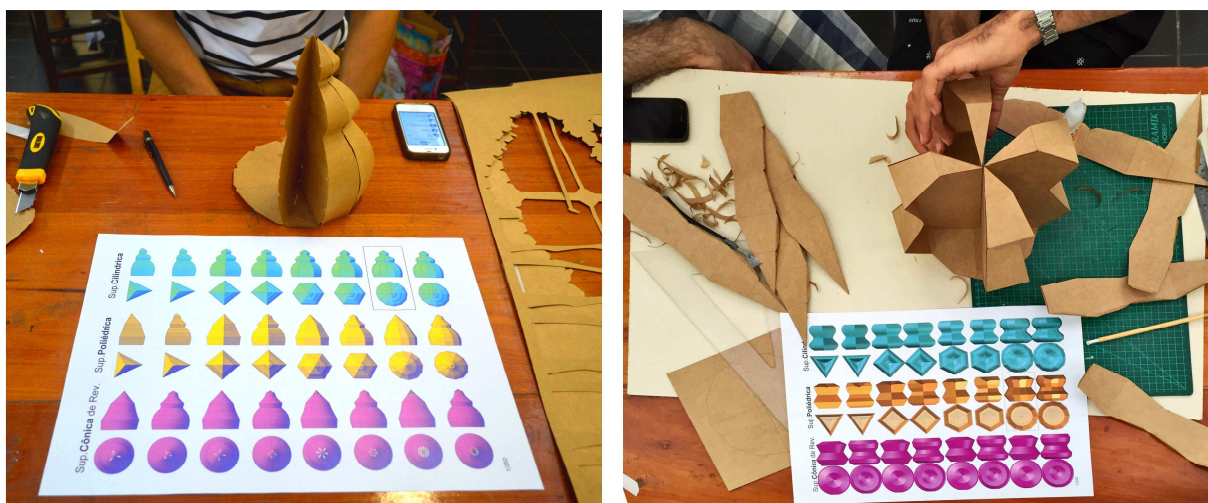
Figuras 124 e 125: elaboração da representação gráfica em AutoCAD / prancha A3 em 1:250
Fonte: o autor, 2016

O exercício estendeu-se até a **aula 14**, quando a folha virtual A3 foi concluída, esta folha deveria ser impressa em A3, em casa, e trazida na aula seguinte; a solução escolhida da cúpula foi destacada das demais, por um retângulo (ver figura 125), dela deveria ser construída uma maquete em 1/50.

Ainda na aula 14, o modelo digital em *Rhinoceros*, da cúpula escolhida por cada equipe, foi ponto de partida para confecção das peças da maquete. As equipes também definiram as estratégias de planificação desta maquete (cortes, dobras e abas) e de montagem da mesma (pontos colagem, estruturação, rigidez); No fim da aula, estavam prontos os arquivos digitais, com as peças da maquete planificadas digitalmente; na aula seguinte estes arquivos seriam exportados ao *software* da cortadora a *laser*. Fim da aula 14.

A **aula 15** se inicia no LAMO3D, é a terceira aula no Laboratório de Modelos da FAU-UFRJ, a última aula da disciplina *Geometria Descritiva Aplicada à Arquitetura*.

As equipes, com os arquivos digitais das peças da maquete prontos, começaram o corte a *laser* das peças planificadas em papel kraft. À medida que as peças eram cortadas, procediam à montagem da maquete em 1/50. As pranchas A3 já estavam impressas, com a cúpula escolhida destacada, que correspondia à solução de cúpula que estava em construção (ver figuras 126 e 127).



Figuras 126 e 127: parte gráfica e montagem da maquete da cúpula escolhida, equipes D e E
Fonte: o autor, 2016

Ao final da aula 15 as maquetes, já prontas, foram reunidas, para que todos as pudessem ver e comparar os resultados (figura 128); neste momento estavam também disponíveis as representações gráficas do trabalho (figura 129).



Figura 128: Objeto 2.1 – maquetes em 1/50 das cúpulas escolhidas de todas as equipes
Fonte: o autor, 2016



Figura 129: Objeto 2.1 - trabalhos de cúpula finalizados - vistas frontal, superior e maquete
Fonte: o autor, 2016

Abriu-se uma discussão com os alunos, sobre os resultados alcançados no último exercício e sobre todo o curso, visto que esta era a última aula.

Quanto ao último trabalho, *Objeto 2.1*, foi destacada a possibilidade de que, com os algoritmos, se produzissem famílias de soluções formais, uma variedade de objetos que poderiam ser oferecidos ao arquiteto-urbanista para que dentre eles fizesse uma escolha, e, caso não estivesse ainda satisfeito, o arquiteto teria como utilizar o algoritmo para produzir tantas outras mais.

O trabalho com o *Objeto 2.1* não seria uma mera repetição do *Objeto 2.0*, alterando a curva e mudando do ambiente 3 para o ambiente 4, mas um estímulo a que os alunos percebessem, nesta experiência, pela sua vivência, algumas das características do ambiente 4, como a que foi salientada no parágrafo anterior.

Na segunda parte do curso e do experimento, foram repetidas algumas operações, que já tinham sido feitas na primeira parte, como a *programação visual*, a *parametrização* ou a *prototipagem rápida*. A isso foram acrescentadas operações, à maioria deles inéditas, não exclusiva, mas recorrentes em ambiente digital, como a *discretização*, a *panelização*, a *otimização* geométrica e a *continuidade* de curvas ou superfícies.

Durante o experimento, não se executaram todas as operações sobre a forma possíveis em ambiente digital, nem se exploraram todos os aspectos que as ferramentas CAD podem proporcionar, como o de se trabalhar com coordenadas locais ou com a topologia, mas nas operações que realizamos os indivíduos de nossa amostra demonstraram capacidade de executá-las e compreendê-las, sem sobressaltos na mudança entre as mesmas e entre os ambientes de projeto; mostraram igual capacidade de transpor o seu conhecimento geométrico de um ambiente a outro, pelas diversas etapas de operar a forma, desde a concepção, passando por sua representação e construção.

Quanto à avaliação dos alunos no *Curso de Geometria Descritiva Aplicada à Arquitetura*, todos foram aprovados, fora um aluno que precisou trancar o curso por motivos pessoais. Todos os alunos se mostraram motivados, interessados em aprender e abertos a novos conhecimentos, do início ao fim do curso.

3.3 ARTICULAÇÃO DO EXPERIMENTO

Essa última seção do capítulo articula o que foi observado na aplicação do experimento com alguns outros pontos da pesquisa, como o problema, hipótese e premissas.

Consideramos a aplicação do experimento bem-sucedida, por permitir reproduzir, em condições controladas e observáveis, situações ideais à pesquisa. Nelas os indivíduos da amostra, conhecedores da geometria descritiva em um ensino tradicional, foram levados a operar múltiplas ferramentas gráficas.

Apontamos, como problema, o fato da descritiva não dialogar satisfatoriamente com as diversas ferramentas gráficas, particularmente as mais recentes ferramentas CAD, que não utilizam o processo PI2D. Concluímos que durante a aplicação do experimento, os indivíduos da amostra, com aptidão para operar a forma em PI2D, demonstraram a capacidade de transpor operações sobre a forma realizada em descritiva para outros ambientes ou processos, como o PC3D, mesmo que esses ambientes ou processos, assim como as ferramentas gráficas utilizadas, lhes fossem recém-apresentados.

Durante o experimento, constatou-se que o conhecimento e domínio, pelos indivíduos da amostra, das operações espaciais sobre a forma, foi determinante para o sucesso desta transposição, mais que o hábito ou a proficiência em executar esta operação em alguma interface gráfica específica, como é a épura, ou o fato de utilizarem alguma ferramenta analógica ou digital específica. Como exemplo, uma vez conhecedores de uma superfície de revolução, os indivíduos conseguiam gerar esta mesma superfície em outros ambientes e com outras ferramentas, a despeito do conhecimento ter sido adquirido em descritiva ensinada de maneira tradicional.

Estas constatações nos levam a afirmar que tenha se estabelecido um diálogo, dos conhecimentos adquiridos em descritiva com as operações subsequentes sobre a forma, mesmo que realizadas com ferramentas novas e em ambientes diversos. No entanto, não se mediu no experimento o quanto que o seu próprio formato contribuiria para que esse diálogo acontecesse. A sequência da

alternância entre os ambientes 1, 2, 3 e 4⁴⁴, com as mesmas operações sendo executadas em cada um destes ambientes, promoveria condições favoráveis a que associações se estabelecessem entre o que se pratica em descritiva e alguma operação em ambiente ou ferramenta diversos do tradicional.

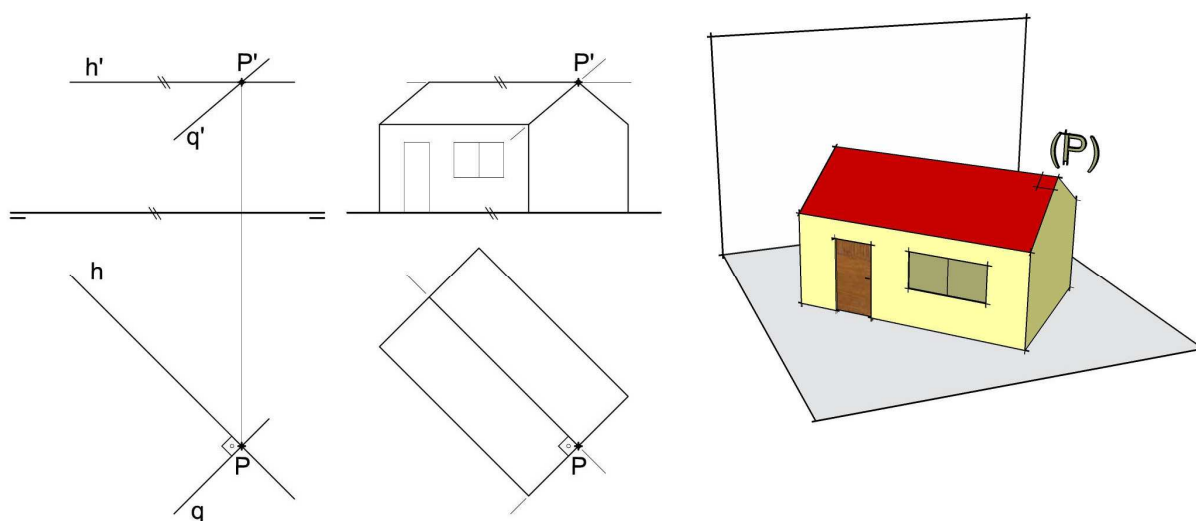
Os alunos não foram submetidos a outras condições que as do experimento. Assim, não se observou se este diálogo se estabeleceria, ou se os indivíduos mostrariam a mesma aptidão, para transpor o que aprenderam em descritiva a novas ferramentas e ambientes, sob outras condições. Posto isso, podemos afirmar que não se garante que este diálogo necessariamente aconteça, caso fossem dadas outras condições, não cabendo uma generalização.

Ao avaliarmos o problema de pesquisa, após a aplicação do experimento, concluímos ser possível estabelecer um diálogo do conhecimento geométrico adquirido em um curso de geometria descritiva, mesmo sendo um curso tradicional, com as subsequentes operações sobre a forma por meio de diversas ferramentas gráficas, analógicas ou digitais. No entanto, o experimento nos mostra que este diálogo pode ser proporcionado por ações ligadas à educação gráfica do aluno de arquitetura e urbanismo, que vão além do ensino da descritiva; como exemplo de ação temos a de expor, o indivíduo, a ambientes de ensino onde ferramentas gráficas e ambientes de projeto tenham uma abordagem integrada.

Quanto à hipótese, que considera necessária uma adequação do ensino do saber geométrico para responder às alterações nas ferramentas gráficas, a consideramos válida, mesmo que adequações no ensino da descritiva por si só não eliminem o problema apontado pela pesquisa.

Antes mesmo da realização do experimento, as premissas de pesquisa já chamavam a atenção para uma necessária adequação no ensino de geometria descritiva. No capítulo um, já se havia destacado que a introdução de ferramentas CAD, que não utilizam processos PI2D, acabaram por levar o arquiteto-urbanista, quando opera a forma, a não utilizar parte do que tradicionalmente lhe foi ensinado em descritiva, ao menos como rebatimento ferramental direto, em todos os ambientes de projeto. Esta argumentação se reforça com o exemplo a seguir:

⁴⁴ Ambientes: *Analógico+PI2D / Digital+PI2D / Digital+PC3D / Digital+PC3D+Programação Visual*. Recomendamos rever o quadro 3, na página 85.



Figuras 130, 131 e 132: projetividade do ângulo reto.

Fonte: o autor, 2016

No exemplo, temos os processos PI2D, tanto na épora da figura 130, como na figura 131, em vistas frontal e superior conjugadas em arquitetura e urbanismo; já na figura 132, observamos um modelo elaborado com o processo PC3D.

A reta h , na primeira figura, equivale à cumeeira da casa; e, por ser paralela a um plano de projeção, garantiria que o ângulo de 90° com a reta q no ponto P se manifestasse em sua projeção no plano ao qual é paralela.

Em descritiva, a propriedade de projetividade do ângulo reto, que acontece nessas condições, pode ser determinante a que se resolva um problema na interface da épora, ou que se permita construir retas perpendiculares nas interfaces das figuras 130 e 131, mas se mostra dispensável em PC3D, na figura 132, a despeito do ângulo de 90° existir no espaço, poderia se modelar a casa sem que necessariamente se conheça esta propriedade projetiva.

Seguindo com outro exemplo, é usual no ensino de descritiva que se considere relevante o estudo da posição dos objetos geométricos em relação aos planos de projeção. Na figura 133, temos oito posições de um plano definido por um triângulo, formado por três segmentos de reta:

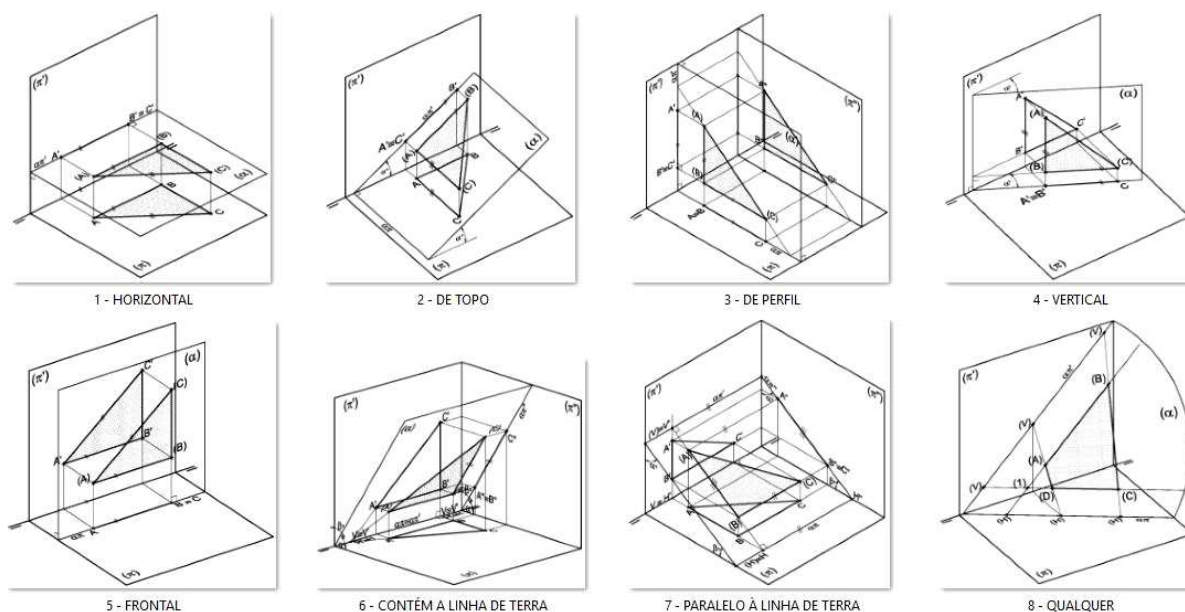
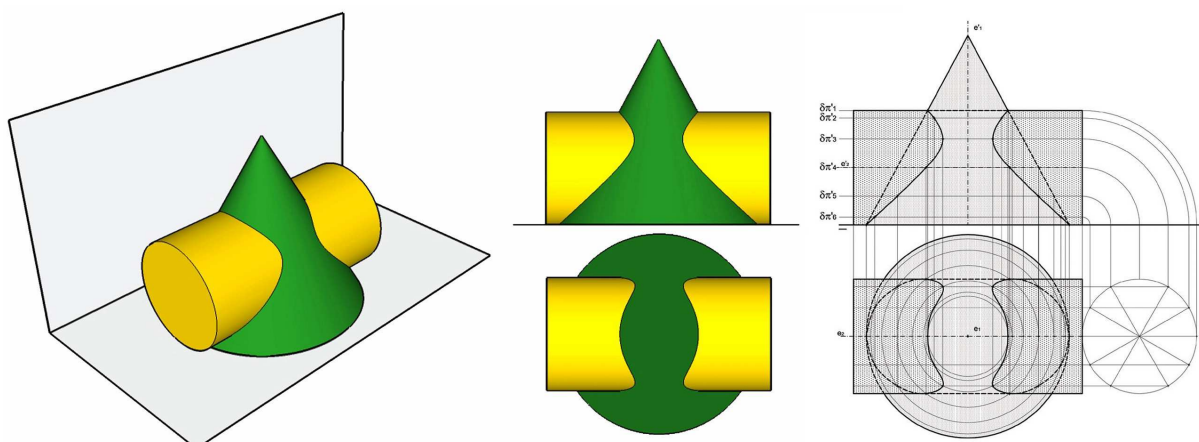


Figura 133: posições de um plano (α) em relação aos planos de projeção (π) e (π') e suas retas.
 Fonte: apostila elaborada pela Prof. Nadia Fatorelli, 2008

Cada uma destas situações determinaria uma maior ou menor facilidade em operar estes mesmos elementos geométricos. Característica que não se observa, ao menos com idêntica correspondência, em PC3D. Em PI2D, dada a relevância destas posições, a descritiva costuma se dedicar a classificá-las por nomes e a estudar o comportamento peculiar dos objetos geométricos em cada uma das posições.

Num terceiro exemplo, operar a forma em PC3D pode simplificar a resolução de problemas geométricos clássicos, como os de interseção, resolvido na figura 134. Na figura 135, simulam-se projeções conjugadas obtidas deste mesmo modelo virtual tridimensional. Ao se operar em PI2D, como se vê na figura 136, uma série de traçados poderia ser requerida para se chegar à mesma solução.



Figuras 134 / 135 / 136: modelo digital / simulação de projeções vertical e horizontal / épura.
 Fonte: http://gd.fau.ufrj.br/exercicios/folhas/gabaritos/gdliex067_a4.jpg - acesso janeiro de 2016.

Resolver a interseção entre cone e cilindro, em épura, como na figura 136, poderia ser, há alguns anos atrás, o mais simples e preciso meio de solução via ferramenta gráfica, hoje não é mais.

A introdução de novos processos, como o PC3D, e de fundamentos matemáticos e geométricos, até então não usuais em arquitetura e urbanismo, desarticulam o rebatimento operacional direto, que se costumava fazer, de alguns conceitos e algumas operações clássicas da descritiva, que eram identificados como aplicáveis e eram transpostos para operações sobre a forma arquitetônica e urbana.

Este não rebatimento operacional contribui para uma percepção da obsolescência de seu ensino. O que se propõe, não é que se retire do ensino da descritiva o ensino dos conceitos envolvidos nos exemplos das figuras 130 a 136, que não se aplicariam em PC3D, mas que possam ser redefinidas as prioridades do que se ensinar em descritiva, com vistas a educar o futuro arquiteto-urbanista, considerando o uso das múltiplas ferramentas gráficas contemporâneas.

Como exemplo, observemos a figura 137. Podemos gerar a superfície cilíndrica de revolução, literalmente rodando a reta em torno de seu eixo, mas também por extrusão da circunferência. Algumas ferramentas gráficas oferecem a geração por extrusão em sua interface, por vezes com maior facilidade de operação prática, via comandos e menus dos *software*.

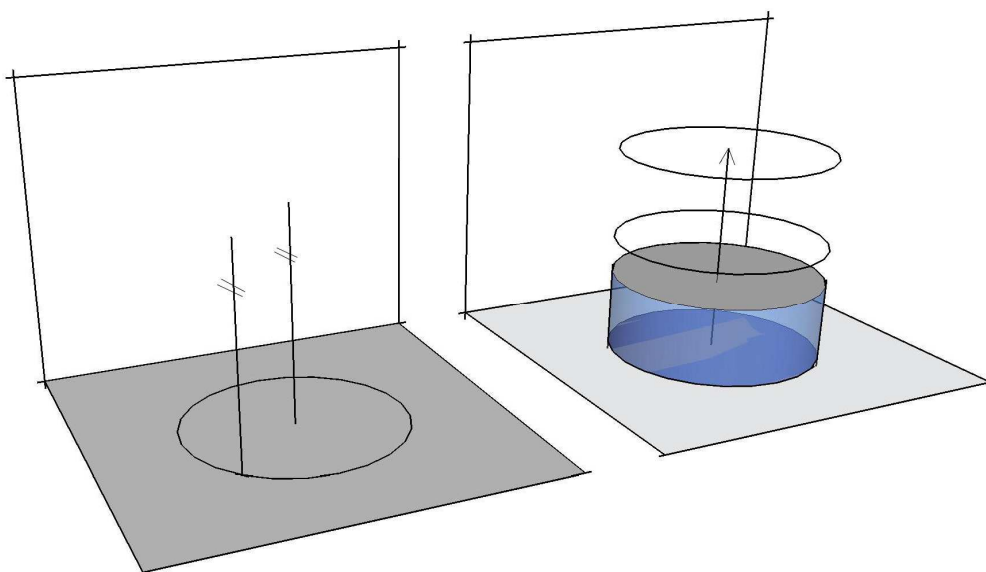


Figura 137: gerar superfície cilíndrica por revolução e extrusão.

Fonte: o autor, 2016

Em ensino de descritiva nem sempre se exploram as muitas possibilidades de se gerar uma mesma forma, como vimos na figura 137. Estudar essas diversas maneiras é exemplo de ação que pode ser feita em ensino, variações que se identificam aplicáveis em arquitetura e urbanismo, por meio de múltiplas ferramentas gráficas e em diversos ambientes de projeto.

O experimento reforçou uma das premissas da pesquisa, que se teria perdido a correspondência direta entre a interface clássica da descritiva com a totalidade das ferramentas gráficas utilizadas pelo arquiteto-urbanista. Ele também mostra que, apesar disso, é possível que se estabeleça um diálogo entre o conhecimento prévio de descritiva, mesmo que adquirido da maneira tradicional, com as mais recentes ferramentas gráficas CAD.

Também se confirma a presença recorrente, observada no experimento, quando no uso de ferramentas CAD, de conceitos geométricos e de operações nem sempre utilizadas com o uso de ferramentas gráficas analógicas.

A seguir, nas considerações finais, apontamos caminhos possíveis para que melhor se promova o diálogo entre o ensino de geometria e o uso de diversas ferramentas gráficas em arquitetura e urbanismo, que é o objetivo geral dessa pesquisa.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Essa tese situa a geometria descritiva na educação gráfica em arquitetura e urbanismo, desde a etapa de pesquisa bibliográfica e escolhas de referências teóricas, no capítulo um; passando pela elaboração e montagem de um experimento, no capítulo dois; seguida da aplicação do experimento e articulação de seus resultados com as etapas anteriores de pesquisa, no terceiro e último capítulo.

A pesquisa investigou as relações entre a geometria descritiva e as operações realizadas com a forma arquitetônica. Operações que foram compreendidas como os procedimentos de concepção, representação e construção da forma. As ferramentas gráficas, analógicas e digitais, foram consideradas como instrumentos para a realização dessas operações.

Mais do que se fixar nas ferramentas gráficas, a pesquisa identificou ambientes de se operar a forma em projeto arquitetônico ou urbano, que seriam promovidos por essas ferramentas. As características desses ambientes de projeto foram o ponto de partida para se destacar, em um experimento de pesquisa, as interações que poderiam ocorrer entre o conhecimento prévio de geometria e as subsequentes operações sobre a forma, realizadas nesses ambientes.

A despeito do viés adotado em pesquisa, o papel da geometria descritiva não se restringe a fundamentar as operações sobre a forma, com o uso de ferramentas de desenho. Sua contribuição, à educação gráfica, vai além de uma utilização operacional direta, promove o desenvolvimento do raciocínio espacial e do pensamento gráfico e geométrico, proficiências desejáveis ao arquiteto urbanista.

As operações sobre a forma estudadas em descritiva são operações espaciais, fato que independe de qualquer ferramenta gráfica ou técnica utilizada, embora seja notável a associação que se costuma fazer da descritiva com uma interface operacional específica, que é a *épura*.

A descritiva sempre apresentou uma relação estreita com as ferramentas gráficas, desde a época de sua sistematização, no fim do século XVIII, feita por Monge. Essa investigação identificou, em literatura, que o fato da descritiva se ver aplicável a práticas já existentes, particularmente na produção das representações da forma arquitetônica, foi determinante à introdução deste saber, oriundo da matemática, no campo da arquitetura e urbanismo.

Os estudos de Monge e seus discípulos acabaram por proporcionar precisão em operações sobre a forma. A descritiva se mostrou adequada às técnicas e ferramentas gráficas de então, que se baseavam no processo PI2D, ou *Processo de Concepção Intermediado por Representações Bidimensionais Conjugadas*⁴⁵.

A partir da interface plana da écura, utilizada em descritiva para operar a forma geométrica, se estabeleceu uma correspondência com a interface igualmente plana das plantas baixas e vistas. Foi possível relacionar as ferramentas gráficas utilizadas na écura com as ferramentas e técnicas utilizadas na elaboração das representações em arquitetura e urbanismo. Estabelecida e sistematizada a prática de utilizar o processo PI2D, seja em geometria, seja em arquitetura e urbanismo, criou-se um vínculo destas operações sobre a forma com as suas respectivas interfaces planas de representação gráfica.

Os ambientes operacionais em arquitetura e urbanismo se diversificaram com as ferramentas CAD. Alguns ambientes deixaram de oferecer um rebatimento direto e facilmente identificável, entre as operações realizadas sobre a forma em geometria descritiva e as realizadas em arquitetura e urbanismo.

Com a difusão do uso das ferramentas CAD, que utilizam processos como o PC3D, ou *Processo de Concepção por Construção Tridimensional de um Objeto Virtual*, o caráter operacional da descritiva se viu questionado quanto à sua adequação, no âmbito da educação gráfica a futuros arquitetos. As interfaces gráficas das ferramentas em descritiva e arquitetura perderam a correspondência direta.

As ferramentas CAD passaram a utilizar conceitos matemáticos pouco aplicados em arquitetura e urbanismo, tais como os de espaço não euclidiano⁴⁶, ou a praticar operações sobre a forma não usuais, como a geração de formas por algoritmos, via programação visual⁴⁷. A difusão destes conceitos e operações, igualmente não usuais no estudo da descritiva, contribuiu também para a percepção de inadequação de seu ensino.

⁴⁵ Para Processo de Concepção, ver seção 1.2.1, página 35.

⁴⁶ Ver página 39.

⁴⁷ Ver página 41.

A pesquisa se concentrou, inicialmente, na identificação de conceitos e operações sobre a forma emergentes com o uso das novas ferramentas CAD, isso foi feito por consulta à literatura. Posteriormente, elabora-se e aplica-se um experimento a estudantes de arquitetura e urbanismo. Nesse experimento se observou como ocorreria o reatamento ferramental da geometria descritiva, ensinada nos moldes de um curso tradicional, no uso dessas ferramentas CAD.

Os indivíduos submetidos ao experimento tinham proficiência em geometria descritiva e ferramentas gráficas analógicas, com pouca ou nenhuma prática em ferramentas digitais. Os alunos passaram por quatro ambientes de projeto⁴⁸, definidos nessa pesquisa como ambientes característicos, ou típicos, de algumas das ferramentas CAD mais utilizadas em arquitetura e urbanismo. Os estudantes passaram por etapas análogas a de um projeto: concepção, representação e construção. No experimento, foi observada a relação de seus conhecimentos prévios em geometria descritiva com a execução de operações sobre a forma, promovidas nesses ambientes de projeto.

Os indivíduos se mostraram aptos a transpor o conhecimento geométrico a outras ferramentas gráficas, mesmo em ambientes de projeto que não lhes eram usuais. O experimento mostrou ser possível haver um diálogo, entre os conhecimentos previamente adquiridos em geometria descritiva, mesmo que por um ensino tradicional, com as subseqüentes operações sobre a forma intermediadas pelas ferramentas gráficas CAD.

A despeito desta transposição ter ocorrido, o experimento confirmou alguns pontos de inadequação, que a pesquisa já havia concluído ao consultar a literatura. Dentre os pontos estava o de que algumas ferramentas gráficas CAD, mesmo realizando operações espaciais idênticas às realizadas em descritiva, não apresentam uma interface gráfica correspondente à interface clássica da épura. O experimento confirmou que as novas interfaces ofereceram matizes importantes a estas operações, como a de possibilitar a aplicação de novos conceitos geométricos. Embora possa ser estabelecido um diálogo, entre o ensino tradicional da geometria descritiva e a operação de ferramentas CAD, ele não é hoje tão direto como no passado.

⁴⁸ Ver quadro 3, na página 85.

Retomemos aqui o objetivo geral da pesquisa, que foi contribuir para adequar o ensino de geometria, em particular o da geometria descritiva, em escolas de arquitetura e urbanismo, às operações sobre a forma realizada por meio de múltiplas ferramentas gráficas, sejam analógicas ou digitais, de interface 2D ou 3D. Partiu-se do princípio de que uma maior correspondência, entre o que se ensina em geometria e o que se pratica nas operações sobre a forma, contribuiria para promover esta adequação.

Para atingirmos este fim, alguns objetivos específicos foram alcançados no decorrer dos capítulos da tese. O primeiro foi o de destacar algumas mudanças que as ferramentas digitais estimularam nas operações de geração, representação e construção da forma arquitetônica. Quanto ao segundo objetivo, houve a identificação das alterações na utilização de fundamentos matemáticos e geométricos que apoiassem a execução destas operações.

A pesquisa apontou, no capítulo um, algumas das mudanças mais relevantes nas operações sobre a forma e nos fundamentos geométricos. Operações de discretização⁴⁹, ou de geração paramétrica⁵⁰ das formas com o uso de scripts computacionais⁵¹ ou de programação visual⁵², foram identificadas como recorrentes, o mesmo ocorreu com a utilização de conceitos geométricos a apoiar estas operações, vide os conceitos de curvatura gaussiana⁵³ e o de propriedades locais da forma⁵⁴, dentre outros.

Com a aplicação do experimento, formatado no capítulo dois e executado no capítulo três, atingimos o terceiro objetivo específico, que foi o de reconhecer aplicações possíveis da geometria descritiva em diferentes ferramentas digitais, mesmo que não utilizem interfaces análogas à épura. Este reconhecimento se deu pela observação do diálogo que os alunos de arquitetura e urbanismo estabeleciam, do seu conhecimento geométrico, com as ferramentas e ambientes de projeto que lhes eram novos. O elenco de operações e conceitos, destacado no capítulo um, foi retomado no experimento de pesquisa, quando os alunos foram postos a realizar estas novas operações e a utilizar estes novos conceitos.

⁴⁹ Ver página 55.

⁵⁰ Ver página 49.

⁵¹ Ver página 40.

⁵² Ver página 41.

⁵³ Ver página 54.

⁵⁴ Ver página 38.

O quarto e último objetivo específico foi o de apontar ações para que o ensino de geometria, em particular o da descritiva, se articule à dinâmica das transformações sofridas na área gráfica, só possível de ser alcançado ao fim do experimento, com a articulação de seus resultados às etapas anteriores de pesquisa.

Ao se adequar o ensino de geometria a futuros arquitetos, devemos ter em conta que, ao se operar as ferramentas CAD, utilizamos fundamentos e conceitos geométricos nem sempre presentes em um escopo programático de um curso de geometria descritiva tradicional. A execução do experimento confirma isso. Esses conhecimentos precisam ser incluídos na formação do aluno de arquitetura e urbanismo. Alguns, como o de programação computacional, podem ser ministrados fora de um curso de geometria.

Ações a serem tomadas em ensino de arquitetura e urbanismo devem ir além da geometria. Recomendamos aos educadores que considerem os diversos ambientes de projeto possíveis, evitando se fixar no PI2D. É fundamental que o aluno atue nesses diversos ambientes de projeto, ação a ser implementada nas próprias disciplinas de projeto de um curso de graduação.

Voltando ao ensino de geometria, consideramos ainda hoje válido salientar a correspondência entre a interface plana da écura e a maioria das representações planas em arquitetura e urbanismo. No entanto, o ensino de geometria não deve se fixar a uma única interface operacional. Mesmo que se utilizem écuras, confeccionadas com ferramentas analógicas, podemos contextualizar as operações realizadas em écura a outros ambientes operacionais. Assim, estimulamos o aluno a fazer a transposição do seu conhecimento geométrico aos mais diversos ambientes de projeto, fazendo-o transitar do PI2D, para o PC3D e outros mais.

Podemos avançar um pouco mais e optar por privilegiar as operações sobre a forma, em detrimento de algum ambiente de projeto específico. O experimento de pesquisa nos traz exemplos de uma mesma operação podendo ser realizada em diversos ambientes de projeto.

Como esse direcionamento pode se manifestar no ensino de geometria? Na seção 1.1 da tese apontamos ações que admitem uma abordagem não

conservadora da descritiva, que não se detenham ao sistema diédrico ou à interface da écura. É fundamental que o arquiteto urbanista adquira a proficiência em geometria. Já a escolha da interface operacional a estudá-la, seja a écura ou outra qualquer, deve ser orientada pelos educadores, a fim de se atingir o objetivo de se transmitir o conhecimento geométrico. Podemos privilegiar a proficiência nas operações geométricas, em detrimento das interfaces de realização destas operações.

Há que se promover uma abertura na educação gráfica em cursos de arquitetura e urbanismo, com ações concretas para que se ministrem conteúdos hoje não ensinados, seja da matemática, de programação computacional, que são necessários no uso das ferramentas CAD.

A pesquisa indica ser possível contribuir para a educação gráfica, explorando a aplicação da geometria integrada às ferramentas CAD e às operações sobre a forma. O experimento de pesquisa, que foi formatado como uma disciplina de um curso de graduação em arquitetura e urbanismo, já nos mostra um caminho possível, que poderá ser desenvolvido em pesquisas futuras.

O experimento é um exemplo de ação em ensino que engloba:

- 1) a geometria, não só os tradicionais tópicos estudados em descritiva, mas também os de outros campos da matemática;
- 2) as ferramentas gráficas e seus característicos ambientes de projeto;
- 3) a articulação dos dois itens anteriores, ao se operar a forma arquitetônica em etapas análogas a de projeto, seja na sua concepção, representação ou construção.

A promoção de *workshop*, com estas mesmas características, é outro formato que tem se mostrado eficaz no ensino de geometria, na seção 2.1 mostramos alguns exemplos.

A despeito do formato, seja disciplina, seja *workshop*, podemos elaborar ações em ensino, composta por conteúdos mistos. A geometria descritiva pode se associar a outros saberes, como a geometria analítica e a demais conceitos matemáticos e geométricos emergentes nas ferramentas CAD mais recentes.

A autonomia da descritiva como disciplina é prescindível. Alguns cursos já ministram conteúdos de seu escopo programático tradicional integrados aos dos de outras disciplinas, por exemplo, ao associá-los com os conteúdos de perspectiva ou de topografia, compondo disciplinas com o nome de *Sistemas Projetivos*, existentes hoje em alguns cursos de graduação.

Gaspard Monge, ao sistematizar a geometria descritiva no final do século XVIII, estudava a geometria com um caráter integrado. Os problemas geométricos, além da abordagem sintética da descritiva que hoje se pratica, eram tratados de modo analítico. O ensino da geometria descritiva praticado após Monge perdeu este aspecto integrado. O momento atual se mostra oportuno à retomada deste aspecto, nos reaproximando do que havia preconizado Monge.

Propomos, em vez de apontar um único caminho, que se abram as possibilidades a abordagens diversas do saber geométrico em ensino. Ações em ensino que tratem de maneira integrada ferramentas CAD, operações sobre a forma, ambientes de projeto e fundamentos matemáticos e geométricos, se mostram promissoras a investigações futuras.

Quanto ao futuro, não será surpresa o surgimento de novas ferramentas CAD, a proporcionar algum novo ambiente de projeto, com demandas específicas de fundamentos geométricos, o que indica a necessidade de nos mantermos em estado permanente de atenção.

REFERÊNCIAS

- ADRIAENSSENS, Sigrid et al (Ed.). **Advances in Architectural Geometry 2016**. Zurich: Vdf Hochschulverlag Ag, 2016. 405 p. Disponível em: <<http://vdf.ch/advances-in-architectural-geometry-2016.html>>. Acesso em: 24 set. 2016.
- AISH, Robert. First build your tools. In: PETERS, Brady; PETERS, Terri (Ed.). **Inside smartgeometry**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2013. p. 36-49.
- BARKI, José. **O risco e a invenção**: um estudo sobre as notações gráficas de concepção no projeto. 2003. 270 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Urbanismo, Departamento de Programa de Pós-graduação em Urbanismo, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: <http://teses.ufrj.br/FAU_D/JoseBarki.pdf>. Acesso em: 06 jan. 2014.
- BOYER, Carl B.; MERZBACH, Uta C.. **História da Matemática**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2012. 508 p.
- BUERY, Cristina Cerqueira et al. EDUCAÇÃO DO OLHAR: A REPRESENTAÇÃO DA FORMA ARQUITETÔNICA NA GEOMETRIA DESCRITIVA. In: GRAPHICA 2011, 20., 2011, Rio de Janeiro. **Anais...** . Rio de Janeiro: Ufrj, 2011. p. 1 - 11. Disponível em: <http://www.graphica.org.br/CD/?pagina=artigos&subpagina=comunicações&lang_user=br>. Acesso em: 11 out. 2015.
- BURRY, Mark. From descriptive geometry to smartgeometry: first step towards digital architecture. In: PETERS, Brady; PETERS, Terri (Ed.). **Inside smartgeometry**: expanding the architectural possibilities of computational design. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2013. p. 154-165.
- CARPO, Mario. **The alphabet and the algorithm**. Cambridge: The Mit Press, 2011. 169 p.
- _____. (Ed.). **The Digital Turn in Architecture 1992-2012**: AD Reader. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2012.
- CECCATO, Cristiano et al (Ed.). **Advances in architectural geometry 2010**. Vienna: Springer Wien New York, 2010. 242 p.
- COMMANDINO, Frederico. **Euclides**: Elementos de Geometria. São Paulo: Edições Cultura, 1944. Tradução de: Aníbal Faro.
- DELEUZE, Gilles. **The fold**: Leibniz and the Baroque. 2. ed. London: Athlone Press, 1993. Tradução de Ton Conley. 110p.
- EIGENSATZ, Michael et al. Case studies in cost-optimized paneling of architectural freeform surfaces. In: CECCATO, Cristiano et al (Ed.). **Advances in Architectural Geometry 2010**. Vienna: Springer Wien New York, 2010. p. 49-72.

FATORELLI, Nadia; SILVA, Antonio Mauricio Pereira da; MARCONE, Raphael. **Sítio de Geometria Descritiva da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio de Janeiro**. 2014. Disponível em: <<http://gd.fau.ufrj.br>>. Acesso em: 03 jan. 2014.

GANI, Danusa Chini. **A geometria de Gaspard Monge: o método descritivo que prescinde da técnica de dupla projeção ortogonal e independe dos meios de representação**. 2016. 209 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Arquitetura, Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Ufrj-proarq, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <<http://objdig.ufrj.br/21/teses/836118.pdf>>. Acesso em: 25 set. 2016.

_____. **As lições de Gaspard Monge e o ensino subsequente da geometria descritiva**. 2004. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <http://teses.ufrj.br/coppe_m/DanusaChiniGani.pdf>. Acesso em: 06 jan. 2014.

HESSELGREN, Lars et al (Ed.). **Advances in architectural geometry 2012**. Vienna: Springer Wien New York, 2012. 343 p.

HENRIQUES, Gonçalo Castro; "Sistemas responsivos: relevância, estado da arte e desenvolvimentos", **XIX SIGraDi**, Informação Projeto para interação, Alice Pereira e Regiane Pupo (eds), Blücher, pp. 200-6, DOI 10.5151/despro-sigradi2015-60042

_____. **TetraScript**: Sistema de aberturas responsivo para controlar a luz, de acordo com fatores externos e internos. 2013. 447 f. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura, Faculdade de Arquitetura, Faculdade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2013.

HENRIQUES, Gonçalo Castro; PASSARO, Andrés. Defying Gravity: from statics to dynamics, from objects to systems. In: **ARCHITECTURE INPLAY CONFERENCES**, 1., 2016, Lisboa. **Architecture In Play Conferences Proceedings**. Lisboa: Instituto Universitário de Lisboa (iscte-iul), 2016. p. 141 - 148.

KILKELLY, Michael. **Which architectural software is right for me?** 2014. Disponível em: <<http://archsmarter.com/which-architectural-software/>>. Acesso em: 27 maio 2015.

KOLAREVIC, Branko. Parametric Evolution. In: PETERS, Brady; PETERS, Terri (Org.). **Inside smartgeometry**: expanding the architectural possibilities of computational design. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2013. p. 50-59.

MARCONE, Raphael; DIAS, Maria Angela. Construir e viver a arquitetura: relatos de um *workshop* em ambiente universitário. **Arquitextos**, São Paulo, v. 1, n. 16, p.1-1, out. 2015. Mensal. Disponível em: <<http://vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/16.185/5785>>. Acesso em: 08 set. 2016.

_____. O ensino da geometria descritiva em escolas de arquitetura brasileiras e as ferramentas CAD. **Educação Gráfica**, Bauru, v. 1, n. 18, p.119-133, maio 2014. Quadrimestral. Disponível em: <<http://www.educacaografica.inf.br/revistas/vol-18-numero-01-2014>>. Acesso em: 20 maio 2014.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de metodologia científica**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2005. 315 p.

MARTÍN-PASTOR, Andrés. Um retorno aos fundamentos da geometria: The Butterfly Gallery - superfícies helicoidais, estratégias para a fabricação digital. **Cadernos Proarq**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 25, p.18-30, dez. 2015. Semestral. Disponível em: <<http://cadernos.proarq.fau.ufrj.br/pt/paginas/edicao/25>>. Acesso em: 29 set. 2016.

MARTÍN-PASTOR, Andrés et al. Los workshops de geometría en Cad3d y prefabricación digital como estrategia docente en la enseñanza de la geometría para la arquitectura, geometría y proyecto. In: XVIII CONFERENCE OF THE IBEROAMERICAN SOCIETY OF DIGITAL GRAPHICS - SIGRADI: DESIGN IN FREEDOM, 18., 2014, Montevideo. **XVIII SIGraDi Proceedings**. São Paulo: Blucher Design Proceedings, 2014. v. 1, p. 213 - 216. Disponível em: <www.proceedings.blucher.com.br/evento/sigradi2014>. Acesso em: 14 out. 2016.

MENGES, Achim; AHLQUIST, Sean (Ed.). **Computational design thinking**. Chichester: John Wiley And Sons Ltd, 2011. 224 p.

MINAYO, Maria Cecília de Souza. **O Desafio do Conhecimento**: Pesquisa Qualitativa Em Saúde. 11. ed. São Paulo: Hucitec, 2015.

MITCHELL, William J. **A lógica da arquitetura**. 2. ed. Campinas: Unicamp, 2008. 303 p. Tradução de: Gabriela Celani.

MONGE, Gaspard. **Géométrie descriptive**: d'une théorie des ombres et de la perspective. 4. ed. Paris: Courcier, 1820. 265 p. Disponível em: <[http://books.google.com.br/books?id=7_u5oeQART0C&dq=gaspard monge&hl=pt-BR&pg=PR3#v=onepage&q=gaspard monge&f=false](http://books.google.com.br/books?id=7_u5oeQART0C&dq=gaspard+monge&hl=pt-BR&pg=PR3#v=onepage&q=gaspard+monge&f=false)>. Acesso em: 06 jan. 2014.

_____. **Géométrie descriptive**: Leçons données aux ecoles normales, l'an 3 de la re?publique. Paris: Baudouin, 1798. 132 p. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/2027/nyp.33433057782306>>. Acesso em: 06 jan. 2014.

MONGE, Gaspard; HACHETTE, M.. **Géométrie descriptive**. Paris: J. Klostermann Fils, 1811. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/2027/nyp.33433057782298>>. Acesso em: 06 jan. 2014.

NARVÁEZ-RODRÍGUEZ, Roberto; BARRERA-VERA, José Antonio. Lightweight Conical Components for Rotational Parabolic Domes: Geometric Definition, Structural Behaviour, Optimisation and Digital Fabrication. In: ADRIAENSSENS, Sigrid et al. **Advances in architectural geometry 2016**. Zurich: Vdf Hochschulverlag Ag, 2016. p. 378-397. Disponível em: <<http://vdf.ch/advances-in-architectural-geometry-2016-e-book.html>>. Acesso em: 14 out. 2016.

NARVÁEZ-RODRÍGUEZ, Roberto; MARTÍN-PASTOR, Andrés; AGUILAR-ALEJANDRE, María. The Caterpillar Gallery: Quadratic Surface Theorems, Parametric Design and Digital Fabrication. In: BLOCK, Philippe et al (Ed.). **Advances**

in Architectural Geometry 2014. Cham: Springer International Publishing, 2015. p. 309-322. Disponível em: <http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-11418-7_20>. Acesso em: 29 set. 2016.

PÉREZ-GÓMEZ, Alberto; PELLETIER, Louise. **Architectural representation and the perspective hinge.** Cambridge: Mit Press, 2000. 505 p.

PETERS, Brady; PETERS, Terri (Ed.). **Inside smartgeometry:** expanding the architectural possibilities of computational design. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2013. 271 p.

PERRELLA, Stephen; CACHE, Bernard. Topological architecture. In: CARPO, Mario (Ed.). **The Digital Turn in Architecture 1992-2012.** Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2012. p. 146-157.

PINHEIRO, Virgílio Athayde. **Noções de geometria descritiva I:** ponto, reta, plano. 5. ed. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1994. 230 p.

_____. **Noções de geometria descritiva II:** mudanças, rotações, rebatimentos, problemas métricos. 4. ed. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico S. A., 1990. 258 p.

_____. **Noções de geometria descritiva III:** Poliedros, seções planas, interseções. 2. ed. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico S. A., 1971.

POTTMANN, Helmut et al. **Architectural geometry.** Exton: Bentley Institute Press, 2007. 724 p.

POTTMANN, Helmut; KILIAN, Axel; HOFER, Michael (Org.). **Advances in architectural geometry 2008.** Vienna: Rfr, 2008. 134 p. Disponível em: <<http://www.architecturalgeometry.at/aag08/>>. Acesso em: 08 set. 2015.

PUPO, Regiane Trevisan. **Inserção da prototipagem e fabricação digitais no processo de projeto:** um novo desafio para o ensino de arquitetura. 2009. 240 f. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?view=000442574>>. Acesso em: 08 ago. 2016.

RAHIM, Ali; JAMELLE, Hina. The economie of elegance, migrating coastlines: residential tower, Dubai. In: CARPO, Mario (Ed.). **The Digital Turn in Architecture 1992-2012.** Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2012. p. 213-220.

RÊGO, Rejane de Moraes. **Educação gráfica e projeção arquitetônica:** As relações entre a capacidade visiográfica tridimensional e a utilização da modelagem geométrica 3D. São Paulo: Blucher Acadêmico, 2011. 261 p.

RODRIGUES, Alvaro J.. **Geometria descritiva:** operações fundamentais e poliedros. 6. ed. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico S. A., 1964. 351 p.

_____. **Geometria descritiva: projetividades, curvas e superfícies**. 3. ed. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico S. A., 1968. 425 p.

RUTTEN, David (Org.). **RhinoScript 101**. Seattle: Robert Mcneel & Associates, 2007. 114 p. Disponível em: <<https://www.rhino3d.com/download/rhino/5.0/RhinoScript101>>. Acesso em: 05 mar. 2016.

SCHUMACHER, Patrik. Parametricism: a new global style for architecture and urban design. In: CARPO, Mario (Ed.). **The Digital Turn in Architecture 1992-2012**. Chichester: Ad Reader, 2012. p. 240-257.

SEABRA, Rodrigo Duarte. **Uma ferramenta em realidade virtual para o desenvolvimento da habilidade de visualização espacial**. 2009. 227 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Escola Politécnica,, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SOUZA, José Victorino dos Santos e (Comp.). **Elementos de Geometria Descritiva: com Aplicações às Artes - Extraído das obras de Monge**. Rio de Janeiro: Imprensa Régia, 1812. 245 p.

STACHEL, Hellmuth. **The status of todays descriptive geometry related education (CAD/CG/DG) in Europe**. 2007. Disponível em: <http://www.geometrie.tuwien.ac.at/stachel/stachel_tokyo.pdf>. Acesso em: 03 jan. 2014.

SUZUKI, Kenjiro. Traditional Descriptive Geometry Education in the 3D-CAD/CG Era. **Journal For Geometry And Graphics**. Vienna, p. 249-258. jul. 2014. Disponível em: <<http://www.heldermann.de/JGG/JGG18/JGG182/jgg18021.htm>>. Acesso em: 15 set. 2015.

TEIXEIRA, Fábio G.; SANTOS, Sérgio L. dos. Hypercal: aplicações no ensino de geometria descritiva. In: GRAPHICA 2015, 22., 2015, Lisboa. **Geometrias & Graphica 2015 Proceedings**. Lisboa: Universidade Lusíada de Lisboa, 2015. v. 1, p. 453 - 463. Disponível em: <<http://www.aproged.pt/geg2015proceedings.html>>. Acesso em: 12 out. 2016.

TENENBLAT, Ketí. **Introdução à geometria diferencial**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2008. 270 p.

TERZIDIS, Kostas. **Algorithmic Architecture**. Oxford: Architectural Press, 2006.

VAUDEVILLE, Bernard et al. How irregular geometry and industrial process come together: a case of study of the "foundation Louis Vuitton Pour la Création", Paris. In: HESSELGREN, Lars et al (Ed.). **Advances in Architectural Geometry 2012**. Vienna: Springer Wien New York, 2012. p. 279-294.

VOLKOV, Vladimir et al. An Innovative Paradigm of Descriptive Geometry Courses. **Journal For Geometry And Graphics**. Vienna, p. 119-128. jan. 2013. Disponível em: <<http://www.heldermann.de/JGG/JGG17/JGG171/jgg17010.htm>>. Acesso em: 15 set. 2015.

WILLIAMS, Chris. Geometry: how smart do you have to be?. In: PETERS, Brady; PETERS, Terri (Ed.). **Inside smartgeometry**: expanding the architectural possibilities of computational design. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2013. p. 130-141.

APÊNDICES

APÊNDICE A - TERMO DE CONSENTIMENTO PARA A OBSERVAÇÃO DOS ALUNOS E COLETA DE DADOS:

TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

Sr(a) foi convidado(a) a participar da pesquisa **intitulada**: *A geometria descritiva em cursos de Arquitetura e Urbanismo e as ferramentas CAD – diálogos possíveis*, que tem como **objetivo**: produzir um estudo que auxilie na elaboração de cursos de geometria descritiva em escolas de Arquitetura e Urbanismo que integrem a geometria descritiva às ferramentas digitais. Esta pesquisa integra o curso de doutorado do pesquisador.

A pesquisa está em andamento desde 2013 e tem o término previsto para março de 2017. Este estudo utiliza como método a observação, e por meio deste coletar dados, de um grupo de alunos pelo pesquisador no ambiente de sala de aula.

Suas respostas serão tratadas de forma **anônima e confidencial**, isto é, em nenhum momento será divulgado o seu nome em qualquer fase do estudo. Quando for necessário exemplificar determinada situação, sua privacidade será assegurada uma vez que seu nome será substituído de forma aleatória. Os **dados coletados** serão utilizados apenas **NESTA** pesquisa e os resultados divulgados em eventos e/ou revistas científicas.

Sua participação é **voluntária**, isto é, a qualquer momento você poderá **recusar-se** a responder qualquer pergunta ou desistir de participar e **retirar seu consentimento**, não acarretando prejuízos em sua relação com o(s) pesquisador (a) ou com a instituição na qual estuda, sua nota na disciplina GD Aplicada independe de seu consentimento ou não em participar desta pesquisa.

Sr (a) não terá nenhum **custo ou quaisquer compensações financeiras**. Os potenciais **riscos envolvidos** são baixos, porém pode haver risco de constrangimento durante a atividade. Caso isso ocorra, o Sr (a) pode recusar-se a participar de alguma atividade da pesquisa.

Entretanto, sua participação poderá contribuir para aumentar o conhecimento científico na área de ensino de Arquitetura e Urbanismo, em particular da Educação Gráfica e da Geometria Descritiva.

Sr(a) receberá uma cópia deste termo onde consta o celular/e-mail do pesquisador responsável, podendo tirar as suas dúvidas sobre o projeto e sua participação, agora ou a qualquer momento. Desde já agradeço!

Raphael Marcone (Professor FAU-UFRJ, Doutorando PROARQ)

Cel: (XX) XXXXX-XXXX e-mail: xxxxxxxxxxxx@xxxx.com

Declaro estar ciente do inteiro teor deste TERMO DE CONSENTIMENTO e estou de acordo em participar do estudo proposto, sabendo que dele poderei desistir a qualquer momento, sem sofrer qualquer punição ou constrangimento. Recebi uma cópia assinada deste formulário de consentimento.

Rio de Janeiro, ____ de abril de 2016.

Participante da Pesquisa:

(nome em letra de forma)

(assinatura)

APÊNDICE B - PLANO DE CURSO E BIBLIOGRAFIA DA DISCIPLINA
GEOMETRIA DESCRITIVA APLICADA À ARQUITETURA DA FAU/UFRJ NO 1º
SEMESTRE LETIVO DE 2016 – 60 HORAS AULA:



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
GEOMETRIA DESCRITIVA APLICADA - 1ºP/2016
PROF. RAPHAEL MARCONE
PLANO DE CURSO

AULA	DIA		CONTEÚDO DA AULA
01	Qua	06	abr Apresentação do curso / Objeto 1.0: definição geométrica, PI2D por épura analógica e relações com as representações gráficas em arquitetura.
02	Qua	13	Objeto 1.0 em PI2D: épura analógica e desenvolvimento (planificação e execução de maquete de estudo).
03	Qua	20	Objeto 1.0 em PI2D: desenho digital em AutoCAD 2D / representações gráficas em arquitetura e relações com a épura / planificar e executar maquete de estudo / desenho digital e corte manual).
04	Qua	27	Objeto 1.0 em PC3D: modelagem digital em Rhinoceros / diversas maneiras de se gerar a mesma forma / planificação automática / vistas e perspectivas a partir do modelo digital.
05	Qua	04	mai Objeto 1.0 em PC3D: introdução à programação visual com algoritmos em Grasshopper + Rhinoceros / elaboração do algoritmo-base para o objeto 1.1
06	Qua	11	Objeto 1.1 a partir do 1.0 em PC3D: Geração de formas a partir do algoritmo-base e composição / vistas e perspectivas a partir do modelo digital / plotagem / planificação digital da maquete.
07	Qua	18	Local: LAMO / Objeto 1.1 em PC3D: montagem da maquete de estudo 1/100, corte a laser e montagem da maquete final em 1/50.
08	Qua	25	Objeto 1.1 em PC3D: finalização do trabalho (retardatários) / exibição dos trabalhos / discussão da experiência.
09	Qua	01	jun Objeto 2.0 / Planificação de superfícies de revolução reversas por aproximação e discretização / elaboração de estratégias comuns a diversas superfícies / divisão das superfícies por equipe.
10	Qua	08	Objeto 2.0 / maquete colaborativa / preparação da planificação das peças das cúpulas.
11	Qua	15	Local: LAMO / Objeto 2.0: corte a laser / finalizar a maquete / comparação dos resultados e discussão.
12	Qua	22	Objeto 2.1 como variação do objeto 2.0, cada equipe elabora a sua cúpula, elaboração de algoritmo em Grasshopper para solucionar qualquer cúpula.
13	Qua	29	Objeto 2.1 / estudos formais para adequação da cúpula a partir da curva diretriz e alteração de parâmetros em seu algoritmo / elaboração da parte gráfica do trabalho.
14	Qua	06	jul Objeto 2.1 / elaboração da planificação escolhendo-se uma dentre as três soluções apresentadas pelo algoritmo / Finalização da parte gráfica do trabalho.
15	Qua	13	Local: LAMO / Objeto 2.1: corte a laser / finalizar a maquete / comparação dos resultados e discussão.

BIBLIOGRAFIA:

CARPO, Mario. **The alphabet and the algorithm**. Cambridge: The Mit Press, 2011. 169 p.

POTTMANN, Helmut et al. **Architectural geometry**. Exton: Bentley Institute Press, 2007. 724 p.

RODRIGUES, Alvaro J.. **Geometria descritiva**: operações fundamentais e poliedros. 6. ed. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico S. A., 1964. 351 p.

_____. **Geometria descritiva**: projetividades, curvas e superfícies. 3. ed. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico S. A., 1968. 425 p.

SCHON, Donald A.. **Educando o profissional reflexivo**: um novo design para o ensino e a aprendizagem. Porto Alegre: Artmed, 2000. 256 p. Tradução de: Roberto Cataldo Costa.

ANEXOS

ANEXO A - EMENTA DA DISCIPLINA GEOMETRIA DESCRITIVA APLICADA À ARQUITETURA - FAU/UFRJ:

GEOMETRIA DESCRITIVA APLICADA À ARQUITETURA – FAR 611

Ementa

Estudo detalhado das formas geométricas e sua aplicação nos elementos arquitetônicos. Coberturas, circulações e estruturas auto-sustentáveis.
Planificações e obtenção de vistas diversas.

Objetivos (300 caracteres)

Estimular o emprego dos conhecimentos adquiridos pelo aluno em **GD I e GD II**, na solução de problemas envolvendo elementos arquitetônicos e/ou composições arquitetônicas.

Metodologia de trabalho didático (300 caracteres)

Ao longo do curso, serão sugeridos problemas envolvendo elementos arquitetônicos e/ou composições arquitetônicas, através de trabalhos individuais ou em grupos, dependendo da complexidade dos temas propostos, que deverão ser resolvidos em épura e com a elaboração de modelos tridimensionais. Como apoio ao desenvolvimento dos trabalhos, serão utilizados o quadro negro com giz em cores e projeções de slides, retroprojektor, ou projeções digitais, relativos aos temas focalizados.

Formas de avaliação

Será apurada a frequência do aluno às aulas, com sua efetiva participação nos trabalhos desenvolvidos e, sendo atribuída nota, de 0,0(zero) a 10,0(dez), ao último trabalho executado em cada mês de aulas, no total de quatro notas; estará aprovado o aluno que, contando com 75% ou mais de frequência às aulas, apresentar média aritmética das notas obtidas igual ou superior a 5,0(cinco).

Bibliografia básica

ASENSI, F. *Geometria descriptiva superior y aplicada*.- Editorial Dossat - Madrid, 1975;
ENGEL, H. *Sistemas estruturais*.- Hemus Editora Ltda. S.P. - 1981;
RANGEL, Alceu Pinheiro. *Desenho projetivo: projeções cotadas*. Livros Técnicos e Científicos, 1975;
MACHADO, A. *Desenho na engenharia e arquitetura*. S.P. 1980;
MONTENEGRO G. *Ventilação e cobertas*. Editora Edgard Blucher Ltda - S.P. 1984.
SA, R. *Edros*. Projeto Editora Associados Ltda. S.P.

Observações

Disciplina complementar

Pré-requisitos: GEOMETRIA DESCRITIVA II – FAR 126 (P)

Carga Horária

Teori	15
a	_____
Prátic	45
a	_____
Total	60

Nº de Turmas

ANEXO B - EMENTA DA DISCIPLINA GEOMETRIA DESCRITIVA 1 - FAU/UFRJ:

GEOMETRIA DESCRITIVA I - GD I – FAR 116

Ementa

Introdução à geometria descritiva e seus elementos. Ponto, reta e plano, figuras, posições relativas, interseções, métodos descritivos. Sólidos com referências arquitetônicas.

Objetivos

Inicializar o aluno na área da representação grafo-técnica e desenvolver sua capacidade de abstração, visão espacial e raciocínio lógico. Ao término do período o aluno deverá ser capaz de reproduzir e resolver, em linguagem plana, a duas dimensões, os problemas tridimensionais relativos a ponto, reta, plano, superfícies poliédricas e poliedros em geral.

Metodologia de trabalho didático

As aulas são teórico-práticas ou práticas. A teoria é apresentada no quadro com o uso de giz em cores e com a apresentação de modelos. O aluno deve resolver os problemas propostos em folhas de exercícios com o acompanhamento do professor, que também os resolve no quadro. Algumas folhas de exercícios são destinadas a trabalho extra-classe. Durante todo o curso os alunos são incentivados pelo professor a procurar resolver os problemas propostos em cadernos de exercícios e coletâneas de provas de períodos anteriores.

Formas de avaliação

O desempenho dos alunos é avaliado através de provas práticas, das folhas de exercícios aplicadas durante o curso e da frequência às aulas. Em uma 1ª avaliação, são consideradas 4 notas que, individualmente, compõem-se de: da média dos conceitos obtidos nas folhas de exercícios resolvidas imediatamente antes de cada prova e do grau obtido em cada uma das 3 provas, tendo a 4ª nota peso 2. É considerado aprovado o aluno que, contando com o mínimo de 75% de frequência às aulas dadas no período, obtém média igual ou superior a 7. Os alunos com presença suficiente mas média inferior a 7 são submetidos a uma 5ª prova, sendo nesta 2ª avaliação consideradas a média aritmética entre a média das 3 maiores notas do período que recebe peso 2 e a nota da 5ª prova que recebe peso 3, é considerado aprovado o aluno com média igual ou superior a 5.

Bibliografia básica

PRINCEPE JUNIOR, A.R. *Noções de geometria descritiva*. São Paulo: Nobel, 1969.
PINHEIRO, Virgílio A. *Noções de geometria descritiva*. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1965.
RODRIGUES, A. J. *Geometria descritiva*. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1962.
LACOURT, Helena. *Noções e fundamentos de geometria descritiva*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1995.
FERNANDEZ, Angel Taibo. *Tratado de geometria descritiva*. Buenos Aires: Libreria y Editorial El Ateneo, 1947.
ROUBAUDI, C. *Traité de géométrie descriptive*. Paris: Masson et Cie., 1948.
ASENSI, I. F. *Geometria descritiva superior y aplicada*. Madrid: Dossat, 1975.

Observações

Disciplina obrigatória.
Pré-requisitos: nenhum.
Co-requisitos: nenhum.
Organização: 3 (três) aulas semanais de 2 (duas) horas-aula cada.

Carga Horária

Teoria 30

Prática 60

Total 90

Nº de Turmas

8 x 30 alunos

ANEXO C - PLANO DE CURSO E BIBLIOGRAFIA DA DISCIPLINA GEOMETRIA DESCRITIVA 1 DA FAU/UFRJ NO 1º SEMESTRE LETIVO DE 2016 – 90 HORAS-AULA:



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
 DARF – Departamento de Análise e Representação da Forma
GEOMETRIA DESCRITIVA 1 – FAR116
 Plano de Curso

Dia			Conteúdo	folhas
01	ter	05	Apresentação do Plano de Curso; Critérios de avaliação e Bibliografia. Projeções Ortogonais. Poliedro (prisma reto); representação dos poliedros pelo método das projeções ortogonais (Gaspar Monge); Projeção sobre um plano horizontal e sobre um vertical; identidade da projeção de um poliedro; representação do prisma reto em épura por seus vértices.	01 a 07
02	sex	08		
03	ter	12		08 e 09
04	sex	15	Pontos Simétricos. Critérios de Visibilidade. Definição e representação de segmento de reta por dois pontos; Definição de uma reta no espaço por seus planos projetantes; aplicação ao estudo das arestas; Verdadeira Grandeza - VG. Classificação das retas em relação aos planos (π) e (π'), aplicação ao estudo das posições das arestas do prisma modelo; Pontos notáveis da reta suporte de uma aresta: traço (H) e traço (V); ponto médio, proporcionalidade; aplicação às arestas dos sólidos.	10
05	ter	19		
06	ter	26		
07	sex	29		
08	ter	03	Posições relativas entre duas retas: - retas paralelas, concorrentes (perpendiculares) e reversas (ortogonais); projetividade do ângulo reto. Aplicação às arestas e diagonais dos sólidos (prisma, pirâmide e poliedros regulares). Definição do plano por duas retas: paralelas ou retas concorrentes; definição do plano pelos traços; aplicação às bases e faces dos sólidos. Planos projetantes e não projetantes; Posição de cada plano no espaço e na épura; propriedades; retas pertencentes a cada plano (conceito de retas notáveis: principais, <i>md</i> e <i>mi</i>); Definição de uma superfície plana (polígono) num plano projetante e num plano não projetante - Aplicação aos planos das bases e faces dos sólidos.	11 a 18
09	sex	06		
10	ter	10		
-	sex	13	MUDANÇA DE PLANO: Mudança de um dos planos de referência para visualizar o sólido (prisma ou pirâmide) de outro ângulo; Aplicação das retas principais de um plano.	19 a 28
11	ter	17	PROVA 1	
12	sex	20	Posições relativas entre reta e plano: reta paralela, oblíqua e perpendicular a um plano. Aplicação de perpendicularismo entre reta e plano. Determinação do plano perpendicular à aresta dada.	29 a 31
13	ter	31	Aplicação da definição de retas de <i>máximo declive</i> e <i>máxima inclinação</i> no plano da base ou da face de um sólido.	33 a 36
			Posição relativa entre planos: planos paralelos, planos secantes e planos perpendiculares. Interseção de planos.	37



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
 DARF – Departamento de Análise e Representação da Forma
GEOMETRIA DESCRITIVA 1 – FAR116
 Plano de Curso

14	sex	03	JUNHO	Posição relativa entre planos: planos paralelos, planos secantes e planos perpendiculares. Interseção de planos.	38
15	ter	07		ROTAÇÃO: Estudo da Rotação por eixo paralelo, concorrente e reverso. Aplicação do método descritivo para determinação da VG de segmentos e ângulos. Planificação da pirâmide oblíqua.	39 a 42
16	sex	10		ROTAÇÃO: Aplicação do método descritivo para determinação da VG de figuras planas em planos projetantes	43 a 46
17	ter	14			
18	sex	17		REBATIMENTO E ALÇAMENTO: Aplicação do método descritivo aos planos projetantes: determinação da VG de figuras planas. Porção útil do 1º diedro no rebatimento.	47 a 54
19	ter	21			
20	sex	24			
21	ter	28		REBATIMENTO E ALÇAMENTO: Aplicação do método descritivo aos planos não projetantes: VG de figuras planas.	
22	sex	01	JULHO	Seção em poliedros: Aplicação da interseção entre reta e plano na determinação da seção plana nos prismas, pirâmides e poliedros.	55 a 61
23	ter	05			
24	sex	08		P2 - DIVULGAÇÃO ENUNCIADO DO TRABALHO	
25	ter	12		Desenvolvimento do trabalho em equipe (em sala de aula)	
26	sex	15		Desenvolvimento do trabalho em equipe (em sala de aula)	
27	ter	19		ENTREGA TRABALHO P2	
28	sex	22		Determinação dos pontos de entrada e saída de uma reta num poliedro.	55 a 64
29	ter	26		REVISÃO	
-	sex	29		PROVA 3	
-	ter	02		PROVA 4	

BIBLIOGRAFIA:

1. *OBSERVAÇÕES TEÓRICAS* – Profa. Maria Angela Dias – Copiadora 4º andar.
2. *NOÇÕES DE GEOMETRIA DESCRITIVA* - Virgílio Athayde Pinheiro - Ed. Ao Livro Técnico S.A. – Rio de Janeiro.
Volume I: Ponto, Reta e Plano;
Volume II: Mudanças, Rotações, Rebatimentos e Problemas Métricos;
Volume III: Poliedros, Seções Planas e Interseções.
3. *GEOMETRIA DESCRITIVA* – Álvaro José Rodrigues - Ed. Ao Livro Técnico S.A. – Rio de Janeiro.
Volume I: Operações Fundamentais e Poliedros;
Volume II: Projetividades, Curvas e Superfícies.
4. *NOTAS DE AULA* – UFV - Luiz F. Reis e Emmanoel de M. Barreto - Viçosa, Minas Gerais - 2007.
5. <http://www.eba.ufrj.br/gd/>

ANEXO D - EMENTA DA DISCIPLINA GEOMETRIA DESCRITIVA 2 - FAU/UFRJ:

GEOMETRIA DESCRITIVA II - GD II – FAR 126

Ementa

Problemas métricos, representação de poliedros e superfícies geométricas (desenvolvíveis e revessas), seções e interseções em geral. Aplicações práticas em arquitetura.

Objetivos

Ao término do período, o aluno deverá estar apto a aplicar esses conhecimentos na criação da forma arquitetônica e na resolução dos problemas relacionados a projetos de arquitetura, acadêmica e profissionalmente.

Metodologia de trabalho didático

As aulas são teórico-práticas, práticas e expositivas. A teoria é apresentada no quadro com o uso de giz em cores e com a apresentação de modelos. Na parte prática, o aluno deve resolver os problemas propostos em folhas de exercícios com o acompanhamento do professor, que também os resolve no quadro. Algumas folhas de exercícios são destinadas a trabalho extra-classe. A parte expositiva consiste na apresentação e análise de imagens (projeção *powerpoint*) de projetos executados de arquitetura onde foram aplicados os poliedros e superfícies apresentados no curso, assim como suas interseções. Material suplementar é ainda disponibilizado no *site* da disciplina, como apostilas, exercícios, gabaritos e modelos digitais em 3D.

Formas de avaliação

O desempenho dos alunos é avaliado através de provas práticas aplicadas durante o curso e da frequência às aulas. Em uma primeira avaliação são consideradas as 3 primeiras provas do curso, sendo calculada a média aritmética das notas correspondentes; o aluno é aprovado com média igual ou superior a 7 (sete) e o mínimo de 75% de frequência às aulas dadas. Os alunos não aprovados na primeira avaliação são submetidos a uma 4ª prova. Neste caso, é calculada a média ponderada entre as três maiores notas das quatro primeiras provas realizadas, sendo a elas atribuídas peso 1, e à 4ª nota peso 2. É aprovado nessa segunda avaliação o aluno que apresenta média igual ou superior a 5 (cinco) e frequência mínima a 75% das aulas dadas no período.

Bibliografia básica

PINHEIRO, Virgílio A. *Noções de Geometria Descritiva - Volumes I, II e III*. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1965.
 RODRIGUES, Alvaro J. *Geometria Descritiva - Volumes I e II*. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico S/A - 1962
 FERNANDEZ, Angel T. *Tratado de Geometria Descritiva*. Libreria y Editorial El Ateneo, 1947.
 ROUBAUDI, C. *Traité de Géométrie Descriptive*. Paris: Maisson et Cie. Ed., 1948.
 ASENSI, F. *Geometria Descritiva Superior y Aplicada*. Madrid: Dossat, 1975.
 FATORELLI, N., MARCONI, R e PEREIRA, M. *Geometria Descritiva II*. Site da disciplina: www.fau.ufrj.br/gd, 2006.

Observações

Disciplina obrigatória
 Pré-requisitos: Geometria Descritiva I.
 Organização: 3 (três) aulas semanais de 2 (duas) horas-aula cada.

Carga Horária

Teoria 30

Prática 60

Total 90

Nº de Turmas

6 x 30 alunos

ANEXO E - PLANO DE CURSO DA DISCIPLINA GEOMETRIA DESCRITIVA 2 DA FAU/UFRJ NO 1º SEMESTRE LETIVO DE 2016 - 90 HORAS-AULA:



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
GEOMETRIA DESCRITIVA II - 1ºP/2016
PROF.ª GUSTAVO PIMENTA / MAURICIO PEREIRA / RAPHAEL MARCONE
PLANO DE CURSO

AULA	DIA			CONTEÚDO DA AULA	EX. AULA	EX. EXTRA	
01	Ter	05	abr	Interseção de Poliedros	1, 2a	2b, 3	
02	Sex	08		Interseção de Poliedros	5a, 4a	4b	
03	Ter	12		Interseção de Poliedros	7, 6a	5b, 6b, 8, 9	
04	Sex	15		Telhado	10abc, 11c	10d, 11a	
05	Ter	19		Telhado	11b, 13	12, 14	
–	Sex	22		Recesso por feriado	–	–	
06	Ter	26		Telhado e Planificação	15, 17	16	
07	Sex	29	mai	Superfícies Piramidal e Cônica	18	19, 20	
08	Ter	03		Superfícies Prismática e Cilíndrica	21, 23	22, 24	
09	Sex	06		Seções Cônicas	25, 26	–	
10	Ter	10		Cone e Cilindro de Revolução e de 2ª Ordem (Sólidos e Superfícies)	27a, 28	27b, 29	
11	Sex	13		GD Aplicada na Arquitetura – aula I	–	–	
12	Ter	17		PROVA I (folhas 01 a 29)	–	–	
13	Sex	20		Conóide, Cilindróide e Parabolóide Hiperbólico	30, 33	31, 32	
–	Ter	24		Semana FAU	–	–	
–	Sex	27		Recesso por feriado	–	–	
14	Ter	31		Vigas Helicoidais e suas Superfícies	35a, 38a	39, 40	
15	Sex	03		jun	Helicóides Revessos de Plano Diretor e Cone Diretor / Vigas Helicoidais	34, 35b, 38b	36, 37
16	Ter	07			Helicóides Circulares (Serpentina, Coluna Torsa, Parafuso de Santo Egidio)	41	–
17	Sex	10			GD Aplicada na Arquitetura – aula II	–	–
18	Ter	14			PROVA II (folhas 30 a 41) (5,0 pontos)	–	–
19	Sex	17			Escada Helicoidal / apresentação do TRABALHO DE ESCADA (5,0 pontos)	42	43
20	Ter	21			Escada Helicoidal	44	45, 46, 47
21	Sex	24			Escada Helicoidal	48	49, 50
22	Ter	28	Esfera / Cúpulas Esféricas		51a, 52a, 68	51b, 52b, 69	
23	Sex	01	jul		Elipsóides e Parabolóide de Revolução	53a, 55, 56a	53b, 54, 56b
24	Ter	05			Hiperbolóide de Revolução – Geratrizes Retilíneas e Seções	57, 58b	58a, 59
25	Sex	08		Toro – Seções	60b, 61	60a, 62	
26	Ter	12		GD Aplicada na Arquitetura – aula III	–	–	
27	Sex	15		Interseção de Superfícies / abóbadas	63a, 70	63b, 71	
28	Ter	19		Interseção de Superfícies	64, 67	–	
29	Sex	22		Interseção de Superfícies	65ac, 66a	65b, 66bc	
30	Ter	26		PROVA III (folhas 51 a 71)	–	–	
–	Sex	29		Resultado parcial (média 7)	–	–	
31	Ter	02		ago	PROVA IV (prova final com toda a matéria)	–	–
–	Sex	05	Resultado final (média 5)		–	–	

Bibliografia:

1. APOSTILA DE APOIO DA DISCIPLINA <http://www.fau.ufrj.br/gd/docs/Apostila_de_Apoio.pdf>
2. NOÇÕES DE GEOMETRIA DESCRITIVA - Volume III: Poliedros, Seções Planas e Interseções
Virgílio Athayde Pinheiro - Ed. Ao Livro Técnico S.A. - Rio de Janeiro
3. GEOMETRIA DESCRITIVA - Volume I: Operações Fundamentais e Poliedros; Volume II: Projetividades, Curvas e Superfícies.
Álvaro José Rodrigues - Ed. Ao Livro Técnico S.A. - Rio de Janeiro
4. DESENHO GEOMÉTRICO - Terceira Parte: Morfologia e Desenho das Curvas.
Benjamin de A. Carvalho - Ed. Ao Livro Técnico S.A. - Rio de Janeiro
5. A HÉLICE NA ARQUITETURA
Maria Adelaide Rabello Albano - Tese de Concurso - 1948

Site: <http://www.fau.ufrj.br/gd>