



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Universidade Técnica de Lisboa

Sistemas Generativos de Projecto: Integração de Ferramentas Digitais no Projecto de Arquitectura

Aplicação ao Caso de Estudo: a Casa Pátio da Medina de Marrakech

Luís Filipe Batista Silveira dos Santos

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Arquitectura

Júri

Presidente: Professor Doutor Pedro Manuel Gameiro Henriques (DECivil/IST)

Orientação: Professora Doutora Maria Luísa de Oliveira Gama Caldas (FAUTL)

Co-orientação: Professor Doutor António Menezes Leitão (DEI/IST)

Vogal: Professora Doutora Maria Helena Neves Pereira Ramalho Rua (DECivil/IST)

Dezembro de 2009

Agradecimentos

À Prof. Doutora Luísa Gama Caldas, por me ter introduzido um novo campo da Arquitectura, pelo apoio e ajuda, pelas conversas enriquecedoras e interessantes, e sobretudo por ter acreditado em mim numa altura em que mais ninguém o fez.

Ao Prof. Doutor António Menezes Leitão, pelo rigor, apoio, encorajamento e pela sua extraordinária paciência em elucidar alguém tão inexperiente em computação.

À Andreia, inestimável companheira, pelo apoio, paciência e ajudas preciosas.

À minha família, especialmente à minha Mãe, ao meu irmão Marco pela paciência e encorajamento e em particular ao meu irmão Hugo, pelo apoio, preocupação, ajuda e amizade profunda.

Resumo analítico

Esta dissertação reflecte sobre o enquadramento e as questões metodológicas relativas à utilização de aplicações computacionais de apoio à elaboração de Projectos de Arquitectura, apresentando os Sistemas Generativos de Projecto (SGP) como as ferramentas digitais mais integradas e completas para uma abordagem exploratória, fundamentada e sustentada do projecto.

Ao integrar processos generativos com técnicas de optimização, os SGP invertem o ciclo iterativo de tentativa e erro inerente ao uso dos *softwares* correntes. Ao aplicar o conceito de *goal oriented design* o processo generativo é orientado para que o desempenho dos resultados se aproxime dos objectivos pretendidos. O seu carácter emergente e a sua abordagem metodológica inovadora tornam urgente o aprofundamento e a consolidação dos conceitos teórico e práticos resultantes da aplicação deste tipo de ferramentas. A dissertação foca-se assim na definição de conceitos subjacentes a esta matéria, aprofundando-os através da análise crítica de três SGP: AudiOptimization, EifForm e Gene_Arch.

De modo a perceber o impacto metodológico da aplicação dos SGP é desenvolvida uma metodologia de parametrização analítica para a Casa Pátio da Medina de Marrakech a ser integrada no Gene_Arch. Pretende-se com isto atingir dois objectivos: provar a transposição de intenções e características arquitectónicas complexas através da definição de regras e constrangimentos; criar um processo generativo que irá permitir o aperfeiçoamento e exploração de estratégias bioclimáticas seculares, ao possibilitar uma síntese entre técnicas tradicionais e tecnologia informática de ponta, de modo a viabilizar soluções arquitectónicas mais sustentáveis e ainda assim adequadas ao seu contexto cultural.

Palavras-chave: Design Generativo, Design Performativo, Sistemas Generativos de Projecto; Projecto orientado para Objectivos; Arquitectura Islâmica; Casa Pátio Marroquina

Abstract

This thesis reflects about the problem of digital architectural design, presenting Generative Design Systems (GDS) as the digital tool that provide a more integrated, creative and complete approach to the architectural design.

By integrating generative design methods with optimization techniques, the GDS inverts the traditional iterative cycle of trial and error, intrinsic to the use of CAD, BIM and Simulation softwares packages. By applying the new concept of *goal oriented design*, the objectives are established first aiming the generative process to the fulfilment of the design criteria by the application of optimization techniques. The emergent features and the new methodology approach, makes urgent the exploration and consolidation of the new theoretical and practical concepts that emerge of the application of this digital design tools. Thus, the dissertation focuses on the understanding of the underlying concepts, expanding them throughout the critical analysis of three GDS examples: AudiOptimization, EifForm and Gene_Arch.

In order to realize the methodological impact, provided by the application of the previous studied concepts, a method for an analytical parameterization for the Patio House of the Marrakech Medina is proposed, to accomplish two major goals: to prove the transposition of complex architectural concepts and features, by the definition of constraints, into a GDS; to conceive a generative process which will allow the improvement and exploration of bioclimatic strategies by merging secular, low-tech strategies with advanced computer technology, in order to conceive more sustainable architectural solutions, while still adapted to their cultural context.

Keywords: Generative Design, Performative Design, Generative Design Systems; Goal Oriented Design; Islamic Architecture; Moroccan Patio House.

Índice

Resumo Analítico	2
Abstract	3
Índice de Quadros e Figuras	8
Siglas e Abreviaturas	17
1. Introdução	18
2. Sistemas Generativos de Projecto – uma Abordagem Integrada ao Projecto.....	22
2.1 Da Evolução das Ferramentas de Projecto Digital	22
2.2 Problema: das Limitações Informáticas e Humanas na Elaboração de Projectos de Arquitectura	24
2.3 Antevisão da Solução: Sistemas Generativos de Projecto	25
2.3.1 Definição de Sistemas Generativos de Projecto	25
2.3.2 Sistemas Generativos	27
2.3.3 Técnicas de Optimização.....	30
2.3.3.1 <i>Simulated Annealing</i>	31
2.3.3.2 Algoritmos Genéticos	32
3. Análise Crítica de Três Sistemas Generativos de Projecto	34
3.1 Audiooptimization	34
3.1.1 Abordagens à Simulação Acústica	34
3.1.2 Abordagem do AudiOptimization ao Problema da Simulação e Optimização Acústica	35
3.1.3 Modelo de Simulação.....	36
3.1.4 Processo de Optimização	37
3.1.5 Implementação e Metodologia de Uso	38
3.1.6 Aplicação Prática – Kresge Auditorium, MIT	40
3.1.7 Discussão.....	42

3.2 EifForm	42
3.2.1 Aplicação de Sistemas Generativos de Projecto ao Estudo de Estruturas	42
3.2.2 Formulação do Problema no EifForm	43
3.2.3 Método Generativo e de Optimização	44
3.2.4 Integração do EifForm em Ambiente CA(A)D	46
3.2.5 Aplicação Prática - Optimização das Trelças de Cobertura da Zona Aquática do Centro Universitário da Carnegie Mellon University, Pittsburgh EUA	49
3.2.6 – Discussão	51
3.3 Gene_Arch	52
3.3.1 Aplicação de Sistemas Generativos de Projecto na Optimização Térmica e Lumínica do Espaço Arquitectónico	52
3.3.2 Método de Simulação Térmica e Lumínica – DOE.2.1 E	53
3.3.3 Método Generativo	54
3.3.4 Método de Optimização	56
3.3.5 Aplicação Prática - Optimização do Desempenho Energético da Torre H da Faculdade de Arquitectura da Universidade do Porto (FAUP)	59
3.3.6 Discussão	63
3.4 Síntese	64
4. Caso de Estudo: Parametrização Analítica de uma Casa Pátio Marroquina	66
4.1 Introdução	66
4.2 Trabalho Precedente	67
4.2.1 Enquadramento Urbano	67
4.2.2 Enquadramento Arquitectónico	69
4.2.3 Gramáticas de Forma	70
4.2.3.1 Gramática de Forma Urbana	70
4.2.3.2 Gramática de Forma da Casa Pátio	71
4.3 Análise do <i>Corpus</i>	73

4.3.1 Metodologia	74
4.3.2 Análise Volumétrica	74
4.3.3 Análise da Configuração Planimétrica	77
4.3.4 Análise da Composição dos Alçados do Pátio	79
4.4 Elaboração do Problema Generativo	83
4.4.1 Processo Generativo Proposto	83
4.4.2 Metodologia	83
4.4.3 Modelo Básico Inicial	84
4.4.4 Regras	86
4.4.4.1 Regras do Comportamento Volumétrico	86
4.4.4.2 Regras da Composição dos Alçados do Pátio	88
4.4.4.3 Regras de Configuração Planimétrica	88
4.4.4.4 Excepções	91
4.4.5 Parâmetros Variáveis do Modelo Básico Inicial	92
4.4.5.1 Parâmetros Variáveis Gerais	93
4.4.5.2 Parâmetros Variáveis Particulares	98
4.4.6 Modelo Experimental	106
5. Conclusão	108
5.1 Sumário	108
5.2 Futuros Desenvolvimentos	112
5.3 Contribuições	113
Bibliografia	114
Anexos	117
Anexo I – Do Processo Generativo até à Construção	118
Anexo II – Procedimento de Cálculo Energético para o Consumo Térmico e Lumínico para o DOE 2.1 E	122
Anexo III – Optimização Pareto: Integração no Gene_Arch e aplicação prática	123

Anexo IV – Tradução das Casas do <i>Corpus</i> a partir da Gramática de Forma	129
Anexo V – Tabelas e Quadros Analíticos do <i>Corpus</i>.....	131

Índice de Quadros e Figuras

Nº Figura/Quadro	Legenda/Fonte	Página
Figura 2.1	Exemplos de simulações computorizadas. À esquerda: diagrama solar para o <i>London City Hall</i> . À direita: pressão do vento na fachada da <i>Bishopsgates Tower</i> . Fonte: Fasoulaki, 2008: 22.	23
Figura 2.2	Disney Concert Hall, projecto da autoria de Gehry Partners, LLP. Comparação entre (à esquerda) esquiço do projecto de Frank O' Ghery e (à direita) imagens do modelo paramétrico digital. Fonte: El Croquis, Nº 117, 2003.	24
Figura 2.3	Ciclo operacional típico de um SGP.	26
Figura 2.4	Padrões gerados por <i>Cellular Automata</i> . Fonte: Fasoulaki, 2008: 11.	28
Figura 2.5	Superfícies geradas pelo Genr8 através da deformação sequencial de uma superfície inicial. Fonte: O'Reilly et al., 2008: 185	28
Figura 2.6	Modelo concebido através de Diagramas de Voronoi no âmbito do projecto Grotto. Fonte: Aranda e Lasch, 2004: http://scriptedbypurpose.wordpress.com/participants/arandalasch/ .	29
Figura 2.7	Semelhança entre as casas projectadas para a Malagueira, pelo Arq. Siza Vieira e um exemplo de uma casas gerada pela gramática – enquadrada na linha tracejada laranja. Fonte: Duarte, 2007: 5.	30
Figura 2.8	Processo de Optimização realizado pelo <i>Simulated Annealing</i> .	32
Figura 2.9	Ciclo operacional de um Algoritmo Genético.	33
Figura 3.1	Ciclo de utilização de algoritmos de simulação computorizada.	35
Figura 3.2	Restrições geométricas: (a) referenciação da transformação; (b) restrição a uma rotação; (c) configurações possíveis resultantes; (d) restrição ao redimensionamento. Fonte: Monks et al., 2000: 82.	39
Figura 3.3	Editor de Materiais e Editor Geométrico do AudiOptimization. Fonte: Monks et al., 2000: 82.	39
Figura 3.4	Especificação do objectivo para o Nível Sonoro (G): (a) 80 ms; (b) 120 ms; (c) total. Fonte: Monks et al., 2000: 82).	40
Figura 3.5	Várias posições para os reflectores acústicos e para a parede detrás	41

do palco: a) a vermelho a solução inicial; (b) a azul solução encontrada pelo algoritmo tendo em conta variáveis geométricas e de materiais. Fonte: Monks et al. 2000: 88.

Figura 3.6	Ciclo operacional do método STSA.	45
Figura 3.7	<i>Feedback</i> dinâmico entre o GC e o EifForm via modelos XML.	47
Figura 3.8	Integração do EifForm com o GC na optimização da estrutura de uma cobertura de um estádio. a) modelo inicial no GC; b) modelo inicial de input para o EifForm; c) Treliças optimizadas pelo EifForm no contexto do estádio. Fonte: Shea, 2005 b: 259.	48
Figura 3.9	<i>The Hylomorphic Project</i> . À esquerda: algumas das iterações produzidas pelo EifForm. Ao centro: solução final detalhada. À direita: vista aérea da estrutura no seu contexto. Fonte: Ahrens, Chandler et al. 2006.	48
Figura 3.10	Esquema do problema estrutural da cobertura da zona aquática do Centro Universitário de Carnegie Mellon University. Fonte: Shea e Cagan, 1999: 10.	49
Figura 3.11	a) solução mais leve encontrada pelo EifForm sem restrição à altura da treliça (massa = 1417 Kg); b) solução mais pesada gerada pelo EifForm sem restrição à altura da treliça (massa = 1468 Kg). Fonte: Shea e Cagan, 1999: 17.	50
Figura 3.12	a) solução simétrica gerada pelo EifForm com uma restrição à altura da treliça a 1/6 do vão e com 7 pontos de apoio fixos para a carga da cobertura (massa = 1564 Kg); b) solução assimétrica concebida pelo EifForm para a mesma situação (massa = 1515 Kg). Fonte: Shea e Cagan, 1999: 18.	50
Figura 3.13	À esquerda a solução mais complexa e à direita a configuração mais simples, do tipo <i>Kingpost</i> , obtidas pelo EifForm. Fonte: Shea e Cagan, 1999: 18.	50
Figura 3.14	Soluções onde a corda inferior é horizontal. Fonte: Shea e Cagan, 1999: 17.	51
Figura 3.15	a) treliça proposta por um dos projectistas (massa = 1932 Kg). As soluções propostas pelo EifForm: b) (massa = 1564 Kg) e c) (massa = 1640 kg). Fonte: Shea e Cagan, 1999: 16-18.	51

Figura 3.16	Ocorrência de novas paredes exteriores no processo generativo de um caso de duas salas adjacentes cujo comprimento e largura são variáveis..	55
Figura 3.17	Paredes exteriores possíveis para a sala 1: A – nenhuma parede exterior surge; B – surge uma parede exterior vertical (E1); C – surge uma parede horizontal (E2); D – surge uma parede exterior na forma de “L” que terá de ser decomposta na sua parte vertical (E1) e na sua parte horizontal (E2).	55
Figura 3.18	Ciclo operacional do Gene_Arch. Este ciclo é repetido até se atingir o limite de gerações definido pelo utilizador.	59
Figura 3.19	Eixos de composição, marcados a vermelho, dos alçados da Torre H da FAUP e a variação máxima (rectângulos maiores) e mínima (rectângulos menores) para cada vão (Caldas, et al. 2001: 3).	60
Figura 3.20	Semelhança das janelas horizontais originais (à esquerda) e propostas pelo Gene_Arch (à direita), no alçado Norte (Caldas et al., 2001: 3).	61
Figura 3.21	Na Fachada Poente o Gene_Arch reduziu e realinou as janelas – à direita – em relação ao alçado existente – à esquerda. Fonte: Caldas et al., 2001: 3.	61
Figura 3.22	Aumento da dimensão dos vãos a Sul e diminuição dos vãos a Nascente efectuado pelo Gene_Arch em relação ao original. Fonte: Caldas et al., 2001: 3.	62
Figura 3.23	Clarabóias existentes, à esquerda, e propostas pelo Gene_Arch, à direita. Fonte: Caldas et al., 2001: 3.	62
Figura 3.24	Hipótese inicial para a geometria da clarabóia de melhor desempenho (à esquerda) e a melhor solução para o desenho da clarabóia encontrada pelo Gene_Arch (à direita). Fonte: Caldas et al., 2001: 6.	62
Figura 4.1	Bairro de <i>Zaouiat Lakhdar</i> . À esquerda – fotografia aérea com o bairro da Medina de Marrakech demarcado a cores. Ao centro: planta isolada do bairro. À direita – rua coberta por construção – <i>derb</i> . Fonte: Imagens elaboradas no âmbito do projecto POCTI/AUR/42147/2001.	68
Figura 4.2	À esquerda: Pátio de <i>Dar Foundouk</i> . À direita: exterior hermético das Casas Pátio. Fonte: Imagens elaboradas no âmbito do projecto POCTI/AUR/42147/2001.	69

Figura 4.3	Esquerda: Derivação Parcial do Bairro <i>Zaouiat Lakhdar</i> . Direita em cima: intérprete da Gramática de Forma Urbana. Direita em baixo: modelo físico de uma nova solução urbana, para o mesmo perímetro urbano de <i>Zaouiat Lakhdar</i> , gerada pelo intérprete e elaborada através de uma impressora de corte por laser. Fonte: Duarte et al., 2007: 338-340.	71
Figura 4.4	Exemplo de uma Casa Pátio presente no <i>Corpus</i> estudado, <i>Dar Charifa</i> .	72
Figura 4.5	Padrão de anéis definido para a Casa Pátio, na gramática de forma previamente desenvolvida.	72
Figura 4.6	Derivação de <i>Dar Foundouk</i> a partir da Gramática de Forma.	73
Figura 4.7	Alas, Galerias e a origem do eixo coordenado (a vermelho) no Padrão Básico da Casa Pátio. À esquerda está representado o piso 0 e à direita está ilustrado o piso 1.	75
Figura 4.8	Determinação da ala (demarcada a linha laranja tracejada) de uma sala de canto (marcada a cor). Se a sala de canto em questão se situasse no piso 0, no caso ilustrado à esquerda ela pertenceria à Ala 4 enquanto que no caso retratado à direita pertenceria à Ala 1.	77
Figura 4.9	Bissimetria implícita das salas de canto em <i>Dar Charifa</i> . À esquerda – planta do piso 0 e marcação dos eixos de bissimetria (linhas laranja tracejadas). À direita – Alterações a realizar (demolições a amarelo e construções a vermelho) para tornar o piso 0 de Dar Charifa totalmente bissimétrico.	78
Figura 4.10	Plantas de <i>Dar 27</i> e sobreposição de seus pisos. A laranja estão marcadas as paredes que não se sobrepõem.	78
Figura 4.11	Planta do piso 1 e corte transversal de <i>Dar Hannah</i> . Como se pode verificar a galeria do pátio é em água.	79
Figura 4.12	Axonometria explodida do 2º anel da Casa Pátio Marroquina com a nomenclatura dos diferentes alçados do pátio. Em baixo os alçados das alas do piso 0 e em cima das alas do piso 1.	80
Figura 4.13	Simetria dos Alçados. Esquerda: alçados simétricos de <i>Dar Frances</i> . Direita: Simetria implícita dos alçados de <i>Dar Foundouk</i> devido sobretudo à existência de vãos centrais. As linhas amarelas	80

representam as demolições e as vermelhas o que seria necessário refazer para tornar os alçados perfeitamente simétricos. representam as demolições e as vermelhas o que seria necessário refazer para tornar os alçados perfeitamente simétricos.

Figura 4.14	Posicionamento dos vãos laterais. À esquerda encontramos a 1ª posição, patente no Alçado 8 (piso1) de Dar Frances. À direita a 2ª posição para os vãos laterais, exemplificada no Alçado 1 (piso 0) de Dar Frances.	81
Figura 4.15	Bissimetria, explícita e implícita, entre alçados. Esquerda: <i>Dar Charifa</i> onde todos alçados são perfeitamente simétricos entre si. As setas, a laranja, representam a correspondência da simetria entre os alçados. Direita – Planta do piso 0 de <i>Dar 33</i> . Nela podemos observar a bissimetria implícita entre os Alçados 2 e 4. Falta um vão (a amarelo) para os Alçados 2 e 4 serem perfeitamente simétricos entre si.	81
Figura 4.16	Alçados Tipo e esquemas em planta correspondentes. Da esquerda para a direita: Alçado Tipo I, Alçado Tipo II e Alçado Tipo III.	82
Figura 4.17	Modelo Básico Inicial. À esquerda planta de cada piso com a nomenclatura das salas (<i>R</i> abrevia <i>ROOM</i>), no centro perspectiva, e à direita axonometria explodida.	85
Figura 4.18	Alçados Paramétricos - Esquerda: Alçado Paramétrico A – aplicado quando o Alçado possui as duas salas de canto. Direita: Alçado Paramétrico B – aplicado quando o Alçado não possui salas de canto. Todas as cotagens indicam dimensões variáveis.	85
Figura 4.19	Possibilidades de configuração das alas do piso 0 determinadas pela Regra 1.	87
Figura 4.20	Localizações possíveis para as escadas (destacadas a cor de laranja) no piso 0 do Modelo Inicial Básico.	89
Figura 4.21	Bissimetria das salas de canto (marcadas a cor) imposta pela Regra 15. A orientação da <i>Room 1 (R1)</i> determina a configuração das restantes salas de canto.	90
Figura 4.22	Configuração das salas de canto determinada pelo primeiro vão da ala onde a sala se localiza. A seta determina a evolução da posição original do Modelo Básico Inicial para a posição final.	90

Figura 4.23	1º Caso Excepcional. Devido à inexistência da Ala 2 as salas <i>ROOM 4</i> e <i>ROOM 7</i> não podem assumir a configuração da <i>ROOM 1</i> deixando por isso de cumprir o princípio de bissetria entre salas de canto. O novo posicionamento da <i>ROOM 4</i> e da <i>ROOM 7</i> obrigam a que os Alçados Paramétricos do Tipo B possuam janelas de sacada.	92
Figura 4.24	2º Caso Excepcional – exemplo onde é permitido que uma sala de canto do piso 1 seja acedida pelo interior.	92
Figura 4.25	Plantas do Modelo Básico inicial com respectivas variáveis volumétricas.	93
Figura 4.26	1º Bloco de ocorrências que define a obrigatoriedade da existência da Ala 2 para formar o U mínimo requerido para conformar o pátio no piso 0.	94
Figura 4.27	2º Bloco de ocorrências. A obrigatoriedade da existência da Ala 2 depende do valor gerado pelo AG para a variável auxiliar <i>Wg2-3</i> .	94
Figura 4.28	Parâmetros Variáveis Dimensionais. Note-se que devido à simetria dos alçados as dimensões do vão <i>Win3</i> são iguais às do vão <i>Win1</i> .	98
Figura 4.29	Eixos coordenados das salas e nomenclatura das paredes de cada sala. À esquerda eixos coordenados das salas. À direita método de atribuição do nome das paredes e determinação do seu azimute para qualquer sala.	99
Figura 4.30	<i>Width, Length e Height</i> de uma sala tipo.	100
Figura 4.31	Orientações possíveis da <i>ROOM 1</i> , conseqüente atribuição dos Alçados Paramétricos às diferentes alas e determinação da <i>Width</i> e da <i>Length</i> da <i>ROOM 1</i> .	101
Figura 4.32	Determinação da <i>Width</i> de uma sala de canto do 1º Caso Excepcional. A sala retratada nesta figura é a <i>ROOM 4</i> .	102
Figura 4.33	Definição de uma galeria através das variáveis imputadas ao comando <i>OVERHANG (OH)</i> .	103
Figura 4.34	Possibilidades de interação entre o tecto de uma sala de canto do piso 0 com a sua congénere do piso 1.	103
Figura 4.35	Dimensões para a sala intermédia quando existem duas salas de canto na sua ala. À esquerda apresenta-se o método de determinação	104

das dimensões para as Alas 1, 3, 5 e 7 enquanto que à direita para as Alas 2, 4, 6 e 8.

Figura 4.36	Divisão das alas, que não possuem salas de canto, em salas intermédias. A divisão da ala é regulada pela variável independente <i>Aux_Rn</i> .	105
Figura 4.37	Casa Pátio concebida para testar o Modelo Inicial Básico. À esquerda a planta do piso 0 e à direita uma perspectiva geral. A única diferença entre pisos é a porta de entrada no piso 0.	106
Figura 4.38	Sequência de Axonometrias que mostram a evolução da implementação do Modelo Experimental, ala a ala.	107
Figura I.I	Aplicação das regras da gramática de forma de modo a obter a triangulação e a associação dos objectos paramétricos aos pontos gerados pelo EifForm. Fonte: Shea et al., 2005a: 23.	119
Figura I.II	Parâmetros do painel de vidro e instalação dos painéis numa estrutura totalmente montada. Fonte: Shea et al., 2005a: 23.	120
Figura I.III	Junções estruturais rebatidas no plano horizontal prontas para serem impressas na bandeja da impressora FDM. Fonte: Shea et al., 2005a: 24.	120
Figura I.IV	Rebatimento dos painéis de vidro ou acrílico. Fonte: Shea et al., 2005b: 24.	120
Figura I.V	Em cima à esquerda: unidade básica de montagem para cada plano triangular. Restantes: exemplos de modelos montados. Fonte: Shea et al., 2005b.	121
Figura III.I	Soluções Pareto Dominadas e Não Dominadas. Fonte: Caldas, 2002b: 2.	123
Figura III.II	O padrão básico do edifício de escritórios (à esquerda) e os seus parâmetros variáveis (à direita).	125
Figura III.III	Indicação dos sentidos permitidos às águas da cobertura.	126
Figura III.IV	Clarabóia gerada automaticamente pela existência de uma cobertura inclinada.	126

Figura III.V	Soluções da frente Pareto e o seu desempenho energético para aquecimento e iluminação. Fonte: Caldas, 2005: 650.	127
Figura III.VI	Vistas da Solução 1 e Gráfico de Intensidade da Adição de Energia para Aquecimento (Kwh/m ²) VS Poupanças em Iluminação Artificial (%) para cada sala em cada mês. Fonte: Caldas, 2005: 650.	128
Figura III.VII	Vistas da Solução 7 e Gráfico de Intensidade da Adição de Energia para Aquecimento (Kwh/m ²) VS Poupanças em Iluminação Artificial (%) para cada sala em cada mês. Fonte: Caldas, 2005: 650.	128
Figura V.I	Identificação dos anéis estudados, nomenclatura das alas, galerias e alçados considerados.	132
Figura V.II	Dimensões gerais consideradas para o Pátio, 1º Anel e 2º Anel.	132
Figura V.III	Eixo das janelas laterais e dimensões consideradas para o seu posicionamento em Alçados do Tipo II e III (Tabela X).	132
Quadro 3.1	Medições das grandezas acústicas para o Kresge Auditório (MIT, USA): Uso de Palestra e de Música Sinfónica. Fonte: Monks et al., 2000: 87.	41
Quadro 3.2	Quadro síntese da análise dos três exemplos SGP estudados.	65
Quadro III.I	Soluções da frente Pareto, respectivas áreas e consumos energéticos para aquecimento e iluminação. Fonte: Caldas, 2005: 650.	127
Quadro IV	As oito casas do Corpus traduzidas em termos da Gramática de Forma elaborada para cada um dos pisos. Fonte: Imagens inseridas elaboradas no âmbito do projecto POCTI/AUR/42147/2001.	129
Tabela V.I	Dimensões do Pátio	133
Tabela V.II	Larguras dos anéis das Casas Pátio. Dg – Profundidade do 1º anel; Wr min. – Largura mínima do 2º Anel, Wr Max. – Largura máxima do 2º anel.	133
Tabela V.III	Width das Janelas Laterais (Wwin1).	133
Tabela V.IV	Width das Janelas Centrais (Wwin2).	134
Tabela V.V	Height das Janelas Laterais (Hwin1).	134
Tabela V.VI	Height das Janelas Centrais (Hwin2).	134

Tabela V.VII	Distância máxima do Pavimento ao Peitoril das Janelas Laterais (Ywin max).	135
Tabela V.VIII	Posicionamento do eixo das janelas laterais em Alçados do Tipo II e III relativamente às dimensões do Pátio.	135
Tabela V.IX	Espessuras de Paredes e respectiva média.	136
Tabela V.X	Altura dos Pisos (do pavimento a eixo da laje). Foi contemplada uma dimensão mínima e outra máxima devido às situações onde os pisos possuem cotas de soleira diferentes. Quando o piso não possui diferentes níveis o valor para a altura do piso foi considerado como o valor máximo.	136
Quadro V.I	Quadro Analítico I – Dar 27	137
Quadro V.II	Quadro Analítico II – Dar 33	139
Quadro V.III	Quadro Analítico III – Dar 73	142
Quadro V.IV	Quadro Analítico IV – Dar Charifa	144
Quadro V.V	Quadro Analítico V – Dar Dounia	146
Quadro V.VI	Quadro Analítico VI – Dar Foundouk	149
Quadro V.VII	Quadro Analítico VII – Dar Frances	151
Quadro V.VIII	Quadro Analítico VIII – Dar Hannah	153

Siglas e Abreviaturas

AG – Algoritmo(s) Genético(s)

AGP – Algoritmo(s) Genético(s) do Tipo Pareto

AGS – Algoritmo Genético Normalizado (*Standard*)

BIM – *Building Information Model*

BR – *Bass Ratio*

CA(A)D – CAD: *Computer Aided Design*; CAAD: *Computer Architectural Aided Design*

CNC – *Computer Numeric Control*

DG – *Deep of the Galleries*

EDT – *Early Decay Time*

FAUP – Faculdade de Arquitectura da Universidade do Porto

FDM – *Fused Deposition Modelling*

G – Nível Sonoro (*Sound Level*)

GWP – *Global Warming Potential*

Hwin – *Height of the window*

Hwin1 – Altura das janelas laterais de cada alçado do pátio

Hwin2 – Altura das janelas centrais de cada alçado do pátio

IACC – *Interaural Cross-Correlation Coefficient*

Lpatio – *Lenght of the Patio*

LR – *Lenght of the Room*

MEF – Método de Elementos Finitos

MicroGA – *Micro Genetic Algorithm*

MIT - Massachusetts Institute of Technology

NURBS – *Non Uniform Rational Basis Spline*

OH – *Overhang*

ORM – *Objective Rating Method*

PR – Prototipagem Rápida

SDI – *Surface Diffusivity Index*

SGP – Sistema(s) Generativo(s) de Projecto

STSA – *Structural Topology and Shape Annealing*

Ti – *Initial Time Delay Gap*

TMY – *Typical Metereological Year*

Wpatio – *Width of the Patio*

Wr – *Width of the 2nd Ring*

WR – *Width of the Room*

Wwin – *Width of the window*

Wwin1 – Largura das janelas laterais de cada alçado do pátio

Wwin2 – Largura das janelas centrais de cada alçado do pátio

Ywin – Distância entre a cota de soleira e o peitoril da janela

Ywin1 – Distância entre a cota de soleira e o peitoril das janelas laterais de cada alçado do pátio

XML – *Extensible Markup Language*

1. Introdução

Esta dissertação reflecte sobre o paradigma, o enquadramento arquitectónico e questões metodológicas relativas à utilização de aplicações computacionais avançadas na elaboração de projectos de arquitectura, apresentando os Sistemas Generativos de Projecto (SGP) como as ferramentas de projecto digital mais integradas e completas para uma abordagem exploratória, fundamentada e sustentada do projecto.

Este trabalho constitui também uma extensão, consolidação e aprofundamento dos resultados de um projecto de investigação¹ em arquitectura no qual o autor participou como bolseiro, e que abordou a integração de Gramáticas de Forma com Algoritmos Genéticos (AG). O projecto visa desenvolver métodos generativos que incorporem a complexidade urbana da Medina de Marrakech (Marrocos) e integrem as gramáticas de forma como processo generativo para o Gene_Arch (Caldas, 2006), um SGP destinado à optimização evolucionária do desempenho térmico e lumínico do espaço. As matérias abordadas no projecto de investigação servem de base a esta tese, nomeadamente na exploração de conceitos teóricos e práticos, dando uma nova perspectiva ao trabalho precedente ao direccioná-lo para um propósito próprio.

A aplicação das ferramentas digitais de projecto, CA(A)D² e BIM³, proporcionaram a automatização dos laboriosos e demorados processos de desenho manual, facilitando o estudo de diferentes soluções e a introdução de alterações em fases mais tardias do projecto. A utilização destes *softwares* foi preponderante na produção arquitectónica contemporânea, pois possibilitou a modelação e manipulação de universo formais mais livres. No capítulo da avaliação da performance dos edifícios, os programas de simulação provaram ser mais fiáveis, rápidos e rigorosos do que quaisquer outros métodos. Apesar do grande contributo que estes dois tipos de aplicações computacionais trouxeram à *praxis* arquitectónica verifica-se que ambos são limitados, não abordando o papel criativo e de apoio à decisão, baseando-se somente numa descrição, realizada pelo utilizador, no intuito de obter ou um modelo abstracto, que represente o objecto arquitectónico, ou uma simulação de determinado aspecto do edifício. Outros dois paradigmas visaram uma maior integração da tecnologia informática no apoio ao projecto: o *design* generativo e o *design* performativo. O *design* generativo baseia-se em métodos algorítmicos no intuito de capacitar o computador na criação de soluções projectuais. Por sua vez, o *design* performativo recorre à utilização de simuladores sofisticados que avaliam a forma e a materialidade proposta pela solução arquitectónica contra critérios de desempenho estabelecidos, de modo a sustentar as alterações necessárias para melhorar a performance do todo .

Recentemente um novo paradigma emergiu: os Sistemas Generativos de Projecto (SGP). Estes sistemas apresentam uma abordagem mais completa do potencial da ferramenta

¹ Projecto de Investigação “*Integrating Shape Grammars and Genetic Algorithms in a Generative Design System: Applications to a New Architectural Curriculum*”, financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) - POCTI/AUR/42147/2001. Investigadora Responsável: Professora Luísa Gama Caldas

² CAD – *Computer Aided Design* – Desenho Assistido por Computador (DAC); CAAD – *Computer Architectural Aided Design* – Projecto de Arquitectura Assistido por Computador (PAC).

³ *Building Information Model* – aplicações paramétricas que associam à descrição geométrica do modelo virtual uma base de dados onde se definem outras propriedades dos elementos modelados.

computacional ao combinar os dois paradigmas anteriores. Deste modo, os SGP capacitam o computador a executar tarefas criativas exploratórias, ao recorrer a processos generativos, e transformam-no efectivamente num parceiro de apoio à decisão ao aplicar técnicas de optimização que irão orientar a geração de soluções para os critérios de desempenho pretendidos. Os SGP introduzem um novo conceito metodológico na abordagem ao projecto, o *goal oriented design* (Caldas e Norford, 1999: 251). Com este conceito a pesquisa projectual é orientada *a priori* para objectivos pré-estabelecidos, ao contrário da metodologia tradicional onde se avalia o desempenho do edifício e *a posteriori* tenta-se melhorar a sua performance ao introduzir, de modo empírico, alterações. Conclui-se que os SGP constituem um verdadeiro ponto de viragem na abordagem metodológica ao projecto, talvez tão importante como foram as primeiras aplicações de programas CA(A)D. Torna-se então essencial aprofundar, desenvolver e consolidar os novos conceitos teóricos e práticos decorrentes da aplicação deste novo tipo de *softwares* de apoio ao projecto de arquitectura.

Esta dissertação possui dois objectivos essenciais: o primeiro, de índole mais teórica, consiste num aprofundamento e numa síntese das questões teóricas e conceptuais subjacentes à prática de projecto suportada pelo computador; o segundo pretende aplicar os conceitos teóricos desenvolvidos de modo a consolidar para o Gene_Arch (Caldas, 2006) a metodologia de parametrização analítica de um *corpus* arquitectónico específico – a Casa Pátio Marroquina. O primeiro objectivo implica reunir e realizar uma síntese crítica sobre o estado da arte de modo a identificar os problemas inerentes ao desenvolvimento do projecto de arquitectura suportado por ferramentas informáticas, e antever a sua solução: a aplicação dos SGP. O segundo objectivo pretende provar a transposição de um conjunto arquitectónico coerente (ou *corpus* estilístico), de natureza vernacular e complexa, para um processo generativo a incorporar no Gene_Arch. A aplicação deste processo generativo também tenciona comprovar o contributo deste SGP na ampliação da pesquisa de soluções, para o problema multi-critério da térmica e da iluminação na arquitectura, e na melhoria efectiva da sustentabilidade⁴ das estratégias adoptadas.

Para atingir os objectivos propostos, a metodologia aplicada consistiu num processo de investigação constante. Num primeiro momento, a metodologia baseou-se numa síntese da revisão bibliográfica, o que permitiu enquadrar a problemática em estudo, antever, definir e caracterizar a sua solução. Na aplicação prática teve-se em conta os conhecimentos discutidos na primeira abordagem ao tema, para se proceder a um exercício de investigação composto pelas seguintes fases: Enquadramento – Análise – Definição do Problema Generativo – Estabelecimento da Metodologia de Parametrização. Assim sendo, a dissertação é dividida em duas partes principais, a primeira correspondente à revisão da literatura, constituída pelos capítulos 2 e 3, e a segunda ao exercício experimental, descrito no capítulo 4.

A revisão da literatura é constituída por duas secções. A primeira corresponde ao capítulo 2 onde se enquadra o paradigma e a evolução das ferramentas de projecto digital, abordando a

⁴ Conceito emergente e transversal na *praxis* arquitectónica contemporânea devido às grandes responsabilidades que o sector da construção possui no aquecimento global, quer seja pelas tecnologias de construção comuns aplicadas ou pelo consumo energético excessivo que as edificações possuem no seu ciclo de vida para responder a critérios de habitabilidade.

problemática das limitações humanas e dos *softwares*, no desenvolvimento do projecto de arquitectura, e a sua solução, os SGP. Para se identificar o problema foi fundamental o estudo do artigo de Jakimowicz (1997), onde se comenta a evolução dos sistemas CA(A)D, as suas limitações e se propõe técnicas computacionais alternativas e inovadoras assentes na modelação paramétrica, na formulação matemática e em Algoritmos Genéticos. Daru e Snjider (1997) aprofundam o debate das insuficiências metodológicas dos programas CA(A)D e das limitações humanas na pesquisa extensiva do espaço de solução, apresentando sistemas generativos baseados em Algoritmos Genéticos (AG) como métodos extensivos da capacidade humana, através do uso do computador. Na definição e caracterização dos SGP, como solução à problemática identificada, a tese de Fasoulaki⁵ (2008) foi importante na definição de conceitos como sistemas generativos, *design* performativo, *design* generativo, bem como na caracterização de diversas técnicas de optimização. Por seu lado a tese de doutoramento de Duarte (2007), onde se propõe uma gramática de forma como método de personalizar a habitação em série, foi relevante na sua abordagem metodológica, na definição de gramáticas de forma e na compreensão das mesmas.

A segunda secção da revisão da literatura focou-se numa análise de três SGP, de modo a definir a sua mecânica operacional, avaliar a sua aplicação prática e a sua relevância metodológica no *modus operandi* projectual. Os três SGP analisados foram:

1) AudiOptimization – desenvolvido por Michael Monks, este SGP propõe a geração de soluções optimizadas no âmbito da acústica de espaços interiores. O artigo de Monks (2000) foi fundamental para perceber os conceitos aplicados na sua concepção, a aplicação prática e os benefícios resultantes da sua utilização, em fases de projecto.

2) EifForm – SGP elaborado por Kristina Shea, visa a concepção e a optimização das estruturas. No artigo de Shea e Cagan (1999) define-se o método generativo e de optimização do EifForm e avalia-se a sua aplicação prática como sistema que incorpora intenções dos projectistas mas também potencia a emergência de soluções criativas. Outro artigo preponderante na compreensão do EifForm é o de Shea et al (2005), onde se aborda a integração do EifForm com o Generative Components (programa de modelação paramétrica e associativa da Bentley Systems) como procedimento de extensão de capacidades e redução das limitações dos dois *softwares*.

3) Gene_Arch – desenvolvido por Luísa Caldas, este SGP direcciona o processo generativo para a optimização do consumo energético dos edifícios assegurando, simultaneamente, os níveis de conforto térmico e lumínico pretendidos. Para a compreensão da mecânica operacional e utilidade dos Algoritmos Genéticos na concepção e pesquisa de soluções alternativas destaca-se a leitura do artigo da autoria de Caldas e Norford (1999). Na pesquisa de mecanismos de optimização cada vez mais adequados para o Gene_Arch é de realçar o trabalho realizado por Caldas (2002a) onde se debate a aplicação de AG do tipo Pareto no Gene_Arch como método de optimização mais apropriado para

⁵ Tese não publicada mas disponível na internet para obtenção do grau de *Master of Science and Arts* no MIT. <http://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/43750/265806046.pdf?sequence=1>

problemas multi-critério⁶. No capítulo da mecânica operacional do SGP e da potencialidade da sua aplicação em casos reais, o artigo de Caldas (2006) constitui-se como uma referência.

A segunda parte da dissertação trata de um caso de estudo que consiste num exercício experimental encetado de modo a consolidar a metodologia de parametrização analítica da Casa Pátio Marroquina para o Gene_Arch. Tendo em consideração a metodologia aplicada, a segunda parte da tese reparte-se nos seguintes pontos:

1) Enquadramento – onde se elabora um contexto urbano e arquitectónico da Medina de Marrakech e da sua Casa Pátio, e se sintetiza o trabalho precedente, realizado no âmbito do projecto de investigação, apresentando as duas gramáticas de forma: a urbana e a da Casa Pátio.

2) Análise – a análise do corpus é fundamental para a elaboração de uma parametrização analítica ou seja de um método generativo que pretende traduzir as características estilísticas presentes num determinado conjunto ou tipologia arquitectónica. O *corpus* arquitectónico, abordado no projecto de investigação, foi estudado de modo detalhado através de três análises: volumétrica, composição dos alçados do pátio e compartimentação interior.

3) Problema Generativo – tendo por base a análise e as conclusões decorrentes foi possível formular o processo generativo seguindo as seguintes etapas: Modelo Inicial Básico – padrão potencial de quase todas as possibilidades encontradas no *corpus*; formulação de Regras e Restrições; identificação de Variáveis; discretização e programação das Variáveis – considerando as regras e restrições estabelecidas.

4) Resultados – onde se verifica a transposição da complexidade identificada no *corpus* para a parametrização e onde se comenta as estratégias encontradas pelo Gene_Arch na melhoria da sustentabilidade das soluções.

Para o enquadramento e a análise foi fundamental o estudo do artigo de Duarte et al. (2007), onde se traça um contexto urbano da Medina de Marrakech, necessário para o desenvolvimento e fundamentação da gramática de forma urbana apresentada, e o artigo de Duarte e Rocha (2006), essencial na caracterização arquitectónica da Casa Pátio Marroquina, na metodologia que emprega para definir um padrão básico do qual derivam todas as possibilidades, e na elaboração de regras e restrições para o caso de estudo elaborado nesta dissertação.

Na formulação do problema generativo, definição de variáveis e seu comportamento foi essencial o estudo dos processos de manipulação formal aplicados no Gene_Arch por Caldas (2002, 2005).

Em síntese, este trabalho demonstra a necessidade do desenvolvimento e aplicação dos SGP, de modo a dar uma resposta cada vez mais integrada e sustentada à complexidade crescente dos diversos critérios projectuais, e ilustra a sua utilidade na extensão da capacidade criativa e no aprofundamento dos conhecimentos que possuímos de problemas multi-critério de natureza complexa.

⁶ Problemas de múltiplos vectores de optimização onde o melhoramento de apenas um é insuficiente pois implica quase sempre a degradação da performance dos restantes.

2. Sistemas Generativos de Projecto – uma Abordagem Integrada ao Projecto

2.1 Da Evolução das Ferramentas de Projecto Digital

O advento dos sistemas CA(A)D⁷ possibilitaram a elaboração dos projectos de arquitectura em ambiente digital. Desenvolvidos para representar a realidade arquitectónica, os programas CA(A)D mostraram-se rápidos, rigorosos, fiáveis e fáceis de utilizar, incidindo nomeadamente no desenvolvimento de desenhos técnicos, bidimensionais que representassem o objecto arquitectónico tridimensional. Pode-se dizer que os sistemas CA(A)D praticamente se resumiam a estiradores electrónicos onde o desenho manual foi automatizado e os processos de reprodução de desenho foram acelerados e simplificados, facilitando o estudo de diferentes alternativas e a introdução de alterações ao projecto.

A evolução deste tipo de aplicações computacionais foi considerável. Os *softwares* foram incorporando progressivamente ferramentas e processos avançados de modelação e visualização tridimensional. A concepção e manipulação de geometria complexas, NURBS⁸, permitiram a criação de formas livres, cuja concepção manual rigorosa era extremamente difícil e demorada, dando azo à exploração de um universo formal cada vez mais rico e diversificado na arquitectura contemporânea.

Com o desenvolvimento de ferramentas de desenho paramétrico desenvolveram-se outro tipo de programas destinados à concepção de projectos de arquitectura em ambiente digital, denominados de BIM (*Building Information Modelling*). Estes sistemas, para além de possuírem as mesmas potencialidades de desenho digital dos CA(A)D, fazem depender as relações espaciais de parâmetros, quantidades e descrição dos diferentes elementos que compõem o edifício sob diversos aspectos⁹ aliando ao modelo tridimensional uma extensa base de dados, que pode ser acedida automaticamente. Com este tipo de *software* o arquitecto deixa de representar o edifício e as partes que o compõem de um modo abstracto, como se tradicionalmente se faz nos softwares CA(A)D, modelando tridimensionalmente um edifício virtual onde as diferentes partes são descritas pormenorizadamente. A partir do edifício virtual é possível retirar diferentes tipos de informação desde da gráfica, constituída pelos desenhos bidimensionais que tradicionalmente compõem o projecto (plantas, cortes, alçados e pormenores), a diversos tipos de quantificação tais como mapas de medições, de quantidades, de trabalho, orçamentos etc. A quantidade e diversidade de informação que podemos extrair do modelo depende do rigor com que especificámos os diferentes elementos que compõem o modelo. Uma das vantagens é a interligação da informação, proporcionada pela descrição e modelação paramétrica das diferentes partes que constituem o todo. Como toda a informação é retirada a partir do modelo tridimensional, onde cada elemento arquitectónico é descrito e modelado através de diversos parâmetros, qualquer alteração que se faça num elemento em específico, seja ela geométrica ou de outro tipo, a informação é automaticamente actualizada em

⁷ CAD – Computer Aided Design – Desenho Assistido por Computador; CAAD – Computer Architectural Aided Design – Projecto de Arquitectura Assistido por Computador.

⁸ NURBS – *Non Uniform Rational Basis Spline* – modelo matemático usado regularmente em programas gráficos para gerar e representar curvas e superfícies.

⁹ Cada elemento arquitectónico, além de ser descrito geometricamente é-o sobre outros aspectos: construtivos, nome, preço, área e dimensões, etc que são fáceis de aceder, manipularem e documentar.

todos os documentos que constituem o projecto. Por exemplo, ao se alterar a geometria de uma parede em planta, todas as suas vistas serão actualizadas tal como as medições e quantidades e outros elementos que se relacionam com a parede em questão. A estreita relação entre diferentes elementos documentais e a reactividade do modelo sob diversos aspectos promove a experimentação, a revisão em qualquer momento do projecto, sem que isso signifique um acréscimo de trabalho significativo, e a minimização dos erros de projecto. Actualmente as soluções BIM multiplicam-se no mercado, e cada vez mais têm sido adoptadas pelos gabinetes de arquitectura.

A introdução de ferramentas digitais na elaboração de projectos não se restringiu à representação arquitectónica expandindo-se a vários tipos de simulação, desde a visual até às do comportamento lumínico, térmico, acústico e estrutural. As simulações computadorizadas consistem em técnicas de modelação utilizadas na previsão do comportamento de um determinado sistema do edifício (térmico, estrutural, acústico, etc.). Estes simuladores analisam problemas de cálculo complexo, apresentam, rapidamente, dados rigorosos, provando ser mais fiáveis e precisos do que os métodos de simulação manual. A utilização de software de simulação permite aos projectistas analisar as soluções que conceberam a partir de ciclos iterativos de modelação – simulação – avaliação, possibilitando avaliar o impacto que determinadas alterações têm no desempenho do projecto. O *feedback* resultante auxilia substancialmente os projectistas a obter, justificar e confirmar, a solução desejada. A partir da interpretação dos dados da simulação os projectistas concebem a elaboração de estratégias de melhoramento de certos aspectos que prejudicam a performance do projecto (Caldas e Norford, 1999). Todavia, o uso de simuladores informáticos requer uma descrição fiel do espaço, a definição correcta do problema a explorar, e uma hipótese inicial de solução plausível para que a interpretação correcta dos dados sustente a concepção de uma alternativa que melhore a performance do sistema analisado. Os mais recentes *softwares* de simulação, além de permitirem a modelação de formas geométricas complexas e de calcularem diversas performances em simultâneo, simplificam em muito a formulação do problema e a interpretação dos dados devido a interfaces gráficos altamente desenvolvidos e intuitivos (Figura 2.1).

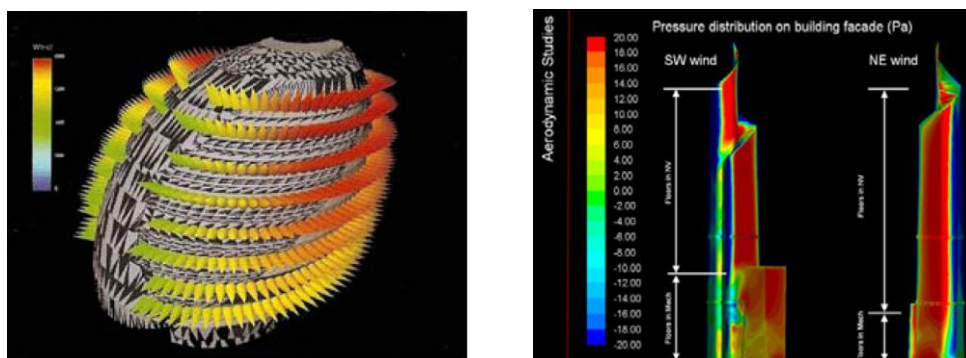


Figura 2.1 – Exemplos de simulações computadorizadas. À esquerda: diagrama solar para o *London City Hall*. À direita: pressão do vento na fachada da *Bishopsgates Tower*. Fonte: Fasoulaki, 2008: 22.

2.2 Problema: das Limitações Informáticas e Humanas na Elaboração de Projectos de Arquitectura

Na elaboração de um projecto, com recurso a ferramentas digitais deparamo-nos com diversas limitações que podem ser de dois tipos: 1) limitações inerentes às ferramentas de projecto digital; 2) limitações subjacentes aos processos cognitivos humanos.

No que diz respeito aos programas CA(A)D e BIM verificou-se que existem limitações sobretudo no suporte a fases iniciais de projecto onde os processos criativos têm grande relevância. Actualmente verificamos que este tipo de programas não suportam ferramentas que sustentem e desenvolvam processos criativos e imaginativos (Jakimowicz et al., 1997). Geralmente os arquitectos não começam a criar através do computador mas sim através do esquiço, (Jakimowicz et al., 1997). Os diversos programas CA(A)D e BIM ainda não conseguiram reproduzir a função do esquiço como método que proporciona uma resposta quase imediata a um estímulo ou a uma ideia qualquer (Daru e Snijder, 1997: 141). O tempo que se gasta a modelar no computador é ainda demasiado longo para que possamos usar sistemas CA(A)D ou BIM em fases de conceptualização. Além disto este tipo de programas requerem um grau de precisão muito elevado o que é desvantajoso em fases iniciais do trabalho onde o arquitecto está mais preocupado, por exemplo, com aspectos de disposição funcional ou na procura da forma geral que traduza as suas intenções para o projecto em questão. Mesmo quando é necessário recorrer a avançadas ferramentas de modelação geométrica de modo a explorar formas mais complexas, difíceis de conceber de modo rigoroso e rápido recorrendo a métodos manuais, observamos que a sua concepção é realizada primeiramente através do esquiço (Figura 2.2).

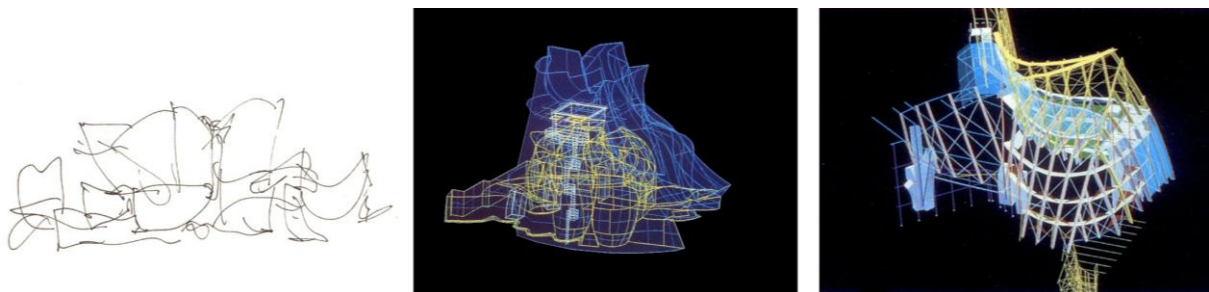


Figura 2.2 – Disney Concert Hall, projecto da autoria de Gehry Partners, LLP. Comparação entre (à esquerda) esquiço do projecto de Frank O' Ghery e (à direita) imagens do modelo paramétrico digital.

Fonte: El Croquis, N° 117, 2003.

Na maior parte dos casos utiliza-se o computador quanto muito para explorar uma solução já muito próxima da final mas sobretudo para modelar a solução final e modificá-la para fins de apresentação. Conclui-se que as aplicações CA(A)D e BIM são ferramentas computacionais que suportam e estendem a acção motora da mão em vez do cérebro para que desse modo assumissem um papel inteligente redefinindo o seu papel como criativo auxiliando efectivamente na tomada de decisões (Daru e Snijder, 1997: 141).

Apesar do esquiço manual ser ainda o método mais adequado nas fases de conceptualização criativa verificou-se que não é necessariamente um método muito eficiente pois a própria criatividade

humana possui limites. Nos seus estudos sobre economia, March e Simons (*cit. in* Daru e Snijder, 1997: 140) observaram que o ser humano tem uma reacção racional limitada. As pessoas são apenas capazes de contemplar alguns factores de decisão sequencialmente e são impelidas a parar a recolha de informação o mais cedo possível, levando-as a aceitar a primeira solução que apresente resultados promissores. Daru e Snijder (1997) confirmaram este comportamento nas experiências que conduziram na disciplina de projecto (*Design Studio*) do curso de arquitectura na Universidade Técnica de Eindhoven: verificaram que a imaginação e a vontade dos alunos explorarem alternativas para um determinado problema diminuía na proporção do sucesso da solução que encontravam primeiro. Os alunos só eram compelidos a considerar novas hipóteses de solução quando aquela que escolhiam se revelava ineficaz (Daru e Snijder, 1997: 140).

No que concerne aos simuladores observamos que estes programas requerem uma total descrição do modelo por parte do utilizador e que o *output* da simulação é um conjunto de dados que terão de ser interpretados pelo utilizador humano. A interpretação correcta dos dados será sempre subjectiva e depende em muito do grau de conhecimento e de experiência do utilizador. A partir desta interpretação é possível identificar problemas de modo a efectuar alterações para os solucionar. Para se verificar o impacto das alterações ter-se-á de remodelar a solução e proceder a uma nova simulação de desempenho. Estes ciclos de tentativa e erro são muito demorados pelo que o sucesso de uma solução depende em muito de uma hipótese inicial verosímil. Conclui-se que os actuais métodos de simulação computadorizada, apesar de terem melhorado e fomentado a noção de performance dos edifícios na concepção e no desenvolvimento de projectos, são demasiado demorados, estáticos e pouco interactivos pois propõem uma pesquisa baseada em ciclos iterativos de tentativa e erro onde a apreciação e o juízo humano possui um papel preponderante.

De modo a responder a estas limitações surgiram novos paradigmas que propõem uma integração mais eficiente do computador no processo criativo e na tomada de decisões na fase de projecto. O desenvolvimento de técnicas generativas e de optimização, apoiadas na programação, capacitam o computador tanto na geração de formas como na optimização do desempenho dos edifícios. A emergência de novas abordagens integradas ao projecto levou à combinação de sistemas generativos a técnicas de optimização originando os denominados Sistemas Generativos de Projecto (SGP). Estes sistemas orientam a concepção de diferentes alternativas e soluções formais tendo em vista a optimização da performance do todo apresentando um novo método no desenvolvimento de projectos – projecto orientado para objectivos (*goal oriented design*). Com estes sistemas o computador deixa de ser mero intérprete e calculador de dados para contribuir activamente na concepção criativa e no apoio às opções de projecto tomadas.

2.3 Antevisão da Solução: Sistemas Generativos de Projecto

2.3.1 Definição de Sistemas Generativos de Projecto

Os Sistemas Generativos de Projecto (SGP) enquadram-se no paradigma de arquitectura digital evolucionária. Segundo Frazer (*cit. in* Kolarevic, 2000: 4) este novo paradigma propõe o

modelo evolucionário da natureza como meio de obter a forma arquitectónica, a partir da expressão de conceitos arquitectónicos:

“(...) in a genetic language which produces a code script of instructions for form generation. Computer models are used to simulate the development of prototypical forms which are then evaluated on the basis of their performance in a simulated environment. Very large numbers of evolutionary steps can be generated in a short space of time and the emergent forms are often unexpected.”

Os SGP são então aplicações computacionais que combinam sistemas generativos, modelos de simulação e técnicas de optimização da performance do edifício ou estrutura. Estes programas orientam a derivação formal a partir da avaliação das diferentes soluções, através de técnicas de simulação, e da optimização progressiva das variáveis de desempenho, recorrendo a algoritmos de optimização, dos aspectos que se pretendem melhorar. Estabelece-se assim um algoritmo evolucionário que para além de ter as capacidades generativas, que se atribuem aos sistemas, inclui um feedback de desempenho na sua derivação formal, dando-lhe deste modo um objectivo e sentido que ultrapassa o campo estético. Isto permite uma nova abordagem ao projecto que inverte totalmente a tradicional baseada em ciclos iterativos de modelação – simulação – avaliação. O arquitecto com estes sistemas estabelece primeiramente os objectivos que determinado projecto se propõe a resolver ao desenvolver o problema de optimização através da definição da função objectivo e dos seus critérios. De seguida elabora um conjunto de regras e restrições que definem o estilo a que as formas deverão obedecer e o universo de possibilidades que o processo generativo pode explorar para finalmente introduzir um input inicial, normalmente traduzido por um modelo primário, que irá desencadear o processo generativo cujas soluções serão progressivamente optimizadas aproximando-se de metas de desempenho previamente estabelecidas. O ciclo operacional proposto pelos SGP está ilustrado na Figura 2.3.

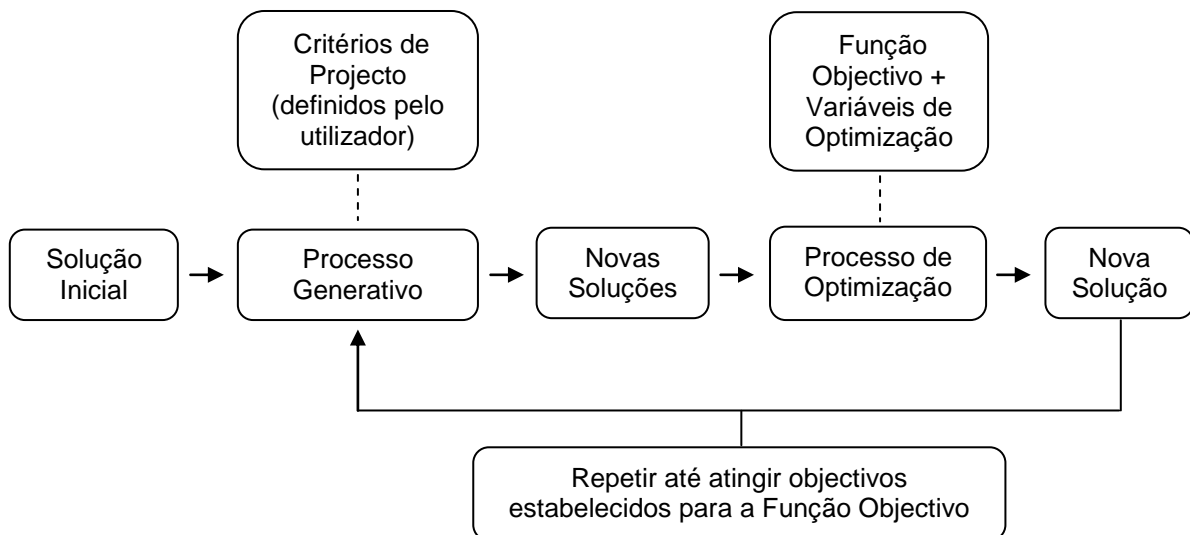


Figura 2.3 – Ciclo operacional típico de um SGP.

Os SGP redefinem totalmente o papel do computador no desenvolvimento de projectos transformando-o efectivamente numa ferramenta criativa e preponderante na tomada de decisões. A criatividade é a capacidade de encontrar novas ideias a partir de partes não conhecidas de uma solução pré-definida ou de transformações de certos aspectos da coisa conceptualizada (Daru e Snijder, 1997: 144). Os SGP conseguem suportar e desempenhar este papel. Ao incorporar uma solução pré-definida é-lhes dada a oportunidade de encontrar e explorar as partes desconhecidas, à razão humana, do espaço de solução envolvido. Deste modo não respondem só às limitações de âmbito conceptual e criativo dos programas CA(A)D e BIM como também colmatam algumas limitações humanas, ao explorar de modo mais abrangente o universo de possibilidades bem, ao comparar os resultados obtidos para o desempenho de determinado aspecto e ao seleccionar as melhores soluções através dos critérios estabelecidos para função objectivo.

Considera-se assim que os SGP são as ferramentas informáticas mais indicadas para dar um suporte efectivo ao projecto, pois são aquelas que além de integrarem o computador no processo de projecto, conseguem também incorporar e sintetizar numa única ferramenta os paradigmas metodológicos que a partir dos quais se conseguem desenvolver e aperfeiçoar projectos: modelação de múltiplas hipóteses, simulação e avaliação do seu desempenho, optimização das soluções projectuais.

De modo a estudar de modo mais aprofundado os SGP é necessário contemplar os processos generativos e técnicas de optimização existentes e desenvolvidas até então.

2.3.2 Sistemas Generativos

Os SGP incorporam processos generativos para poder derivar e conceber novas soluções formais para determinado problema. Sistemas generativos são algoritmos, ou processos baseados em regras, que a partir dos quais várias potenciais soluções podem ser criadas. As regras de um processo generativo incluem parâmetros variáveis (num intervalo pré-estabelecido) que, quando aplicados a um modelo inicial é possível derivar um vasto leque de configurações orientadas para os objectivos de Projecto (Fasoulaki, 2008). Depreende-se então que o modo como se concebe e estrutura um SGP é fundamental pois é ele que permite a exploração formal e concepção de soluções alternativas que irão avaliadas durante a optimização. O processo generativo pode possuir diferentes tipos de controlo, desde processos totalmente automatizados até aos estratificados em etapas de controlo manual.

A forma do objecto sempre fomentou a discussão histórica na teoria e na prática da Arquitectura, contudo após a implementação destes sistemas, a exploração e a inovação formal ganhou uma grande preponderância na produção arquitectónica contemporânea. O que motivou, recentemente, o desenvolvimento de um grande leque de sistemas generativos, muitos deles oriundos de outras disciplinas, tais como a biologia e a matemática. Destacam-se: *Cellular Automata*, *L-systems*, Fractais, Diagramas de Voronoi e Gramáticas de Forma. Estes processos generativos serão explicados sumariamente de seguida:

Cellular Automata (Figura 2.4) – este sistema generativo foi desenvolvido por Neumann nos finais dos anos 40 do século passado (Fasoulaki, 2008: 11). É um modelo discreto que simula o

crescimento biológico através de reprodução própria. Cellular Automata consiste um sistema de células onde cada uma pode ter um número finito de estados. Cada célula é actualizada de maneira sincronizada, de acordo com regras de interacção local, tendo em conta o estado das células vizinhas (Figura 2.4). Este método generativo é utilizado em arquitectura devido à sua capacidade de gerar padrões tendo sido aplicado em campos diversos desde da ornamentação até a geração automática de volumes de edifícios (Fasoulaki, 2008: 11). O gabinete de arquitectura *Rocker Lange Architects* aplicou estes sistemas generativos para em projectos de pesquisa.

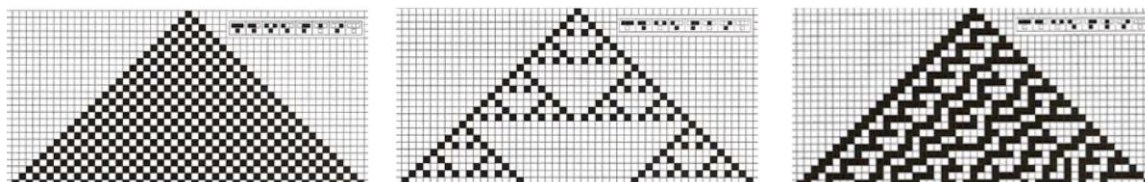


Figura 2.4 – Padrões gerados por *Cellular Automata*. Fonte: Fasoulaki, 2008: 11.

L-Systems – é um método desenvolvido por Lindenmayer em 1968 (Fasoulaki, 2008: 11) que simula o crescimento das plantas. Estes sistemas generativos consistem em quatro elementos: 1) configuração inicial; 2) conjunto de regras; 3) conjunto de restrições; 4) conjunto de variáveis. O conceito subjacente aos *L-Systems* é escrever e reescrever o código substituindo elementos da configuração inicial por outros, baseando-se nas regras definidas, transformando o modelo inicial. O processo aplica-se à nova configuração e a derivação formal repete o mesmo processo durante várias iterações (Fasoulaki, 2008: 11). Os *L-Systems* permitem a concepção de formas complexas a partir de uma forma e conjunto de regras simples tendo sido aplicados na concepção de ferramentas de geração de formas livre como o Genr8, concebido por O'Reilly (2008) e o *Emergent Design Group* (Figura 2.5).

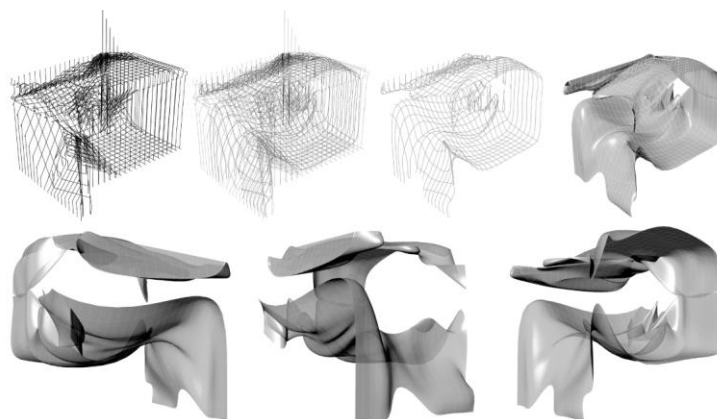


Figura 2.5 – Superfícies geradas pelo Genr8 através da deformação sequencial de uma superfície inicial. Fonte: O'Reilly et al., 2008: 185

Diagramas de Voronoi – estes diagramas pertencem a uma classe de padrões designados por mosaicos de Dirichlet. Um diagrama de Voronoi é um método de decomposição de um espaço em regiões delimitadas por polígonos convexos. Cada polígono contém um ponto de geração e cada ponto de qualquer polígono está mais próximo do ponto de geração do seu polígono do que qualquer

outro. Estes sistemas generativos são utilizados na geração de composições bi e tridimensionais (Fasoulaki, 2008: 12). Aranda e Lasch utilizaram-no na concepção de um modelo de montagem organizacional denominado Grotto (Figura 2.6).

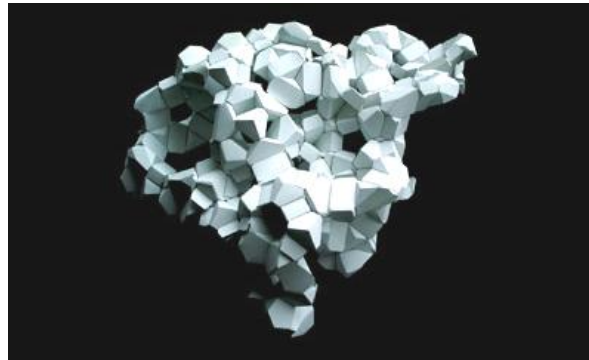


Figura 2.6 – Modelo concebido através de Diagramas de Voronoi no âmbito do projecto Grotto.

Fonte: <http://scriptedbypurpose.wordpress.com/participants/arandalasch/>.

Fractais – os fractais são regras matemáticas que traduzem formas de coisas naturais tais como linhas de costa, nuvens, flocos de neve, etc. São formas geométricas que ao serem subdivididas em partes reproduzem a forma inicial de modo reduzido, ou seja, a subdivisão do todo inicia um processo de auto-similaridade (Fasoulaki, E., 2008: 12). Para estabelecer um processo generativo baseado em fractais há que estabelecer uma forma inicial e um conjunto de regras que substituem cada cópia da forma inicial por cópias ou conjunto de cópias mais pequenas. O arquitecto Greg Lynn baseou a formulação da Casa da Ópera de Cardiff Bay a partir de fractais (Fasoulaki, E., 2008: 12).

Gramáticas de Forma – estes processos generativos foram introduzidos por Stiny e Gips (1972). As gramáticas de formas consistem na aplicação de um conjunto de regras que são aplicadas recursivamente a uma forma inicial. As regras definem a forma, ou uma parte da forma geral, a ser transformada e como o será. Subjacente às regras estão mecanismos de transformações como translação, divisão, escala, rotação, reflexão que veiculam as alterações recursivas ao padrão básico inicial. Quando determinada regra a ser aplicada ao modelo inicial afecta um conjunto de sub-regras então diz-se que a gramática de forma é paramétrica. Com um número finito de *input* estes processos generativos podem gerar um número indefinido de soluções. As gramáticas de forma podem apoiar a emergência de formas (Duarte, 2007), ou seja, podem ser capazes de reconhecer formas que não foram predefinidas mas que emergem na derivação formal durante o processo de computação. As gramáticas de forma podem, ainda, ser classificadas de analíticas ou originais. As analíticas descrevem e analisam estilos históricos ou linguagens de projectos de arquitectura existentes, como a gramática para a *Villa* de Palladio desenvolvida por Stiny e Mitchell em 1978 (Duarte, 2007: 51). As gramáticas originais focam-se na criação de novos estilos de projectos. Estes sistemas generativos provaram ser bastante eficientes na transposição de intenções arquitectónicas. Duarte (2007) desenvolveu uma gramática de forma analítica para as Casas da Malagueira, da autoria do arquitecto Siza Vieira, conseguindo transpor para o computador as sofisticadas regras de composição criadas pelo autor, de

tal modo que o próprio afirmou por vezes ter dificuldade em identificar claramente quais as casas que projectou das geradas pelo programa (Duarte, 2007: 5) (Figura 2.7).

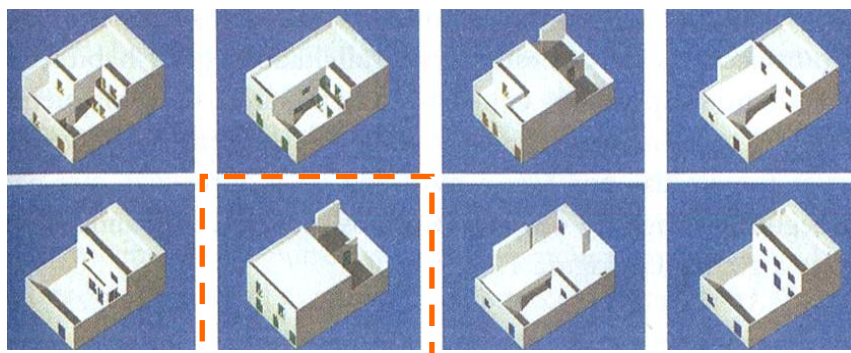


Figura 2.7 – Semelhança entre as casas projectadas para a Malagueira, pelo Arq. Siza Vieira e um exemplo de uma casas gerada pela gramática – enquadrada na linha tracejada laranja. Fonte: Duarte, 2007: 5.

2.3.3 Técnicas de Optimização

Estas técnicas computacionais respondem a um novo paradigma da produção arquitectónica contemporânea, o projecto performativo. Com o acréscimo dos novos requisitos funcionais, que estabelecem padrões mínimo de habitabilidade em diversos tipos de espaços, e a consequente complexidade dos sistemas que compõem um edifício, projectar um espaço tornou-se uma síntese de diferentes disciplinas que muitas das vezes possuem objectivos em conflito. Os factores de performance possuem cada vez mais um papel preponderante no processo de projecto e na exploração formal, dando-lhe um verdadeiro sentido e objectivo. A abordagem performativa ao projecto ultrapassa a aproximação meramente estética e formal proposta pelos sistemas generativos, focando-se no comportamento do edifício, sob variados aspectos, como o principal tema no desenvolvimento do projecto.

É de salientar que a crescente consciência da responsabilidade do sector construtivo no agravamento das condições ambientais do planeta teve um papel preponderante na afirmação deste modelo de desenvolvimento projectual. Contudo, convém referir que, apesar das técnicas de optimização terem sido cada vez mais aplicadas como ferramentas para o desenho sustentável, não se restringem a este campo, abrangendo as mais variadas especialidades desde estruturas, custos, acústica, etc.

Os SGP utilizam as técnicas de optimização como algoritmos indispensáveis no processo de optimização que irá guiar o processo generativo e seleccionar as suas melhores soluções. Estas técnicas de optimização estão sempre associadas a modelos de simulação, necessários para definir o desempenho das soluções concebidas, pelo processo generativo, a optimizar.

Para se optimizar qualquer problema há que primeiro estabelecer o que se quer optimizar, como se vai optimizar e até quando se deve optimizar. Os factores-chave que estão na base na formulação da optimização são:

1) Variáveis de Projecto – são grandezas, quantidades ou expressões matemáticas que formam o espaço de solução, ou seja, que descrevem todas as alternativas possíveis. São manipuladas pelo utilizador humano (Fasoulaki, 2008: 17);

2) Restrições de projecto – definem limites à manipulação das variáveis actuando como limites do espaço de solução. Estabelecem o que não se pode violar no processo de optimização;

3) Objectivos de Projecto (Função Objectivo) – os objectivos de projecto traduzem uma função que se pretende minimizar ou maximizar, a Função Objectivo. Esta função sintetiza e pondera os diversos objectivos numa única expressão. É vital ao processo de optimização pois estabelece um termo de comparação entre as diferentes soluções concebidas. É a partir do valor da função objectiva de cada solução gerada que se avalia o seu grau de aptidão perante as outras configurações.

4) Crítérios de Projecto – são funções explícitas que qualquer solução gerada tem de satisfazer de modo a atingir os objectivos de projectos previamente estabelecidos. Por exemplo suponhamos que se pretendia obter a secção mínima, para esforços de compressão, de um pilar. Apesar de algumas secções não atingirem o seu esforço limite é preciso verificar a sua esbelteza, que funcionaria como um critério de projecto que todas as secções terão de cumprir.

Existem várias técnicas de optimização aplicáveis a SGP contudo ir-se-á comentar dois algoritmos muito utilizados na optimização da performance das estruturas, o primeiro, e de edifícios, o segundo: *Simulated Annealing* e Algoritmos Genéticos. Todavia, dado que os problemas de optimização são muitas vezes multi-objectivo, e como a maior parte dos algoritmos de optimização aplicados nos SGP são de natureza heurística, não possuindo desde logo um critério de convergência claro, não se pode afirmar que as soluções encontradas por estas técnicas de optimização correspondam à solução óptima. Estas técnicas apresentam soluções que melhoram significativamente os níveis de desempenho das soluções iniciais, e que portanto se presume que se aproximam da solução óptima, tendo em conta o carácter multifacetado do problema e a quantidade de parâmetros que o influenciam.

2.3.3.1 *Simulated Annealing*

O *Simulated Annealing* é um algoritmo de optimização combinatório. Este algoritmo realiza a optimização produzindo uma série de transições entre configurações, das hipóteses de solução do projecto, recorrendo à combinação de três processos:

1) Mecanismo de geração – selecciona uma nova configuração do espaço dentro das soluções próximas da configuração corrente (solução que foi computada imediatamente antes);

2) Função Objectivo – avalia a performance da nova configuração através da função que se pretende optimizar.

3) Função de Selecção – aceita ou rejeita a configuração proposta pelo mecanismo de geração, ao comparar o seu desempenho com o da solução corrente. Se este for melhor a nova solução é aceite e por transição irá ocupar o lugar da configuração corrente, se não o for então será rejeitada. Todavia, tanto num caso como no outro, o processo volta ao princípio e repete-se, realizando sucessivos *loops*, até convergir num ponto onde não consiga otimizar mais ou quando chegar ao limite de transições definido pelo utilizador.

O processo utilizado pelo *Simulated Annealing* pode ser descrito na Figura 2.8 e no seguinte pseudo-código que exemplifica a optimização através da procura heurística do mínimo da função objectivo $-f(x)$.

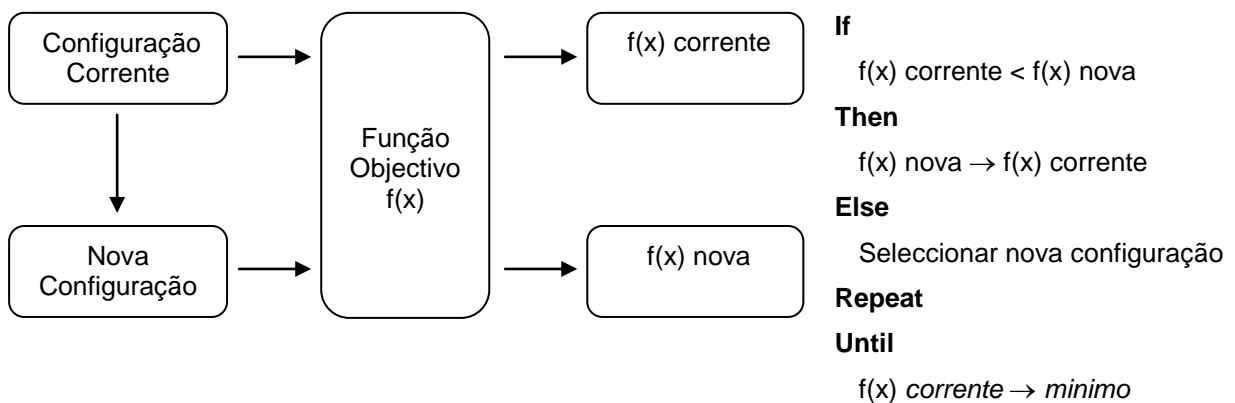


Figura 2.8 – Processo de Optimização realizado pelo *Simulated Annealing*.

2.3.3.2 Algoritmos Genéticos

Os Algoritmos Genéticos foram introduzidos na década de 70 por Holland (1992), do século passado, e desde então têm sido utilizados como métodos adaptativos de pesquisa heurística para resolver problemas de optimização simulando os processos de evolução biológica. Os AG utilizam um conjunto de procedimentos para gerar e seleccionar as soluções de melhor desempenho, tendo em conta os objectivos definido para a Função Objectivo, baseados em noções Darwnísticas como a sobrevivência do mais apto e a selecção natural.

Para o AG, uma solução para o problema em estudo designa-se por indivíduo. Um grupo de indivíduos constitui uma população. Cada vez que uma população é criada dá-se uma geração. Os AG binários representam cada indivíduo através de uma cadeia binária denominada por cromossoma. Cada cromossoma é formado por alelos, os bits binários que codificam as características do indivíduo (Caldas e Norford, 1999: 253). Para gerar novos indivíduos diferenciados o AG recorre a três operadores genéticos:

1) Reprodução – reproduz uma solução da população que foi seleccionada. A probabilidade de uma dada solução ser escolhida é proporcional à adequação dessa mesma solução ao desempenho pretendido para a função objectiva (Caldas e Norford, 1999: 253).

2) Cruzamento – duas partes de dois cromossomas escolhidos aleatoriamente são escolhidos para serem cruzados gerando assim um novo indivíduo (Caldas e Norford, 1999: 253).

3) Mutação – consiste na alteração aleatória de alelos de uma solução para gerar novos indivíduos (Caldas e Norford, 1999: 253).

Tendo em conta estes operadores genéticos o processo de optimização realizado pelo AG começa por gerar um número possível de soluções para o problema. De seguida avalia todos indivíduos, tendo em conta o valor da função objectiva de cada um, e executa uma selecção aplicando os operadores genéticos à população inicial de acordo com o grau de aptidão de cada indivíduo, isto é, de acordo com o desempenho de cada indivíduo. Deste processo emerge uma nova população cuja média de desempenho, em principio, será melhor que da população anterior. A nova população é submetida ao mesmo processo. Este ciclo iterativo é repetido até que o número de gerações, definido pelo utilizador, se esgote (Caldas e Norford, 1999: 253). A metodologia de optimização proposta por estes algoritmos está ilustrada na Figura 2.9.

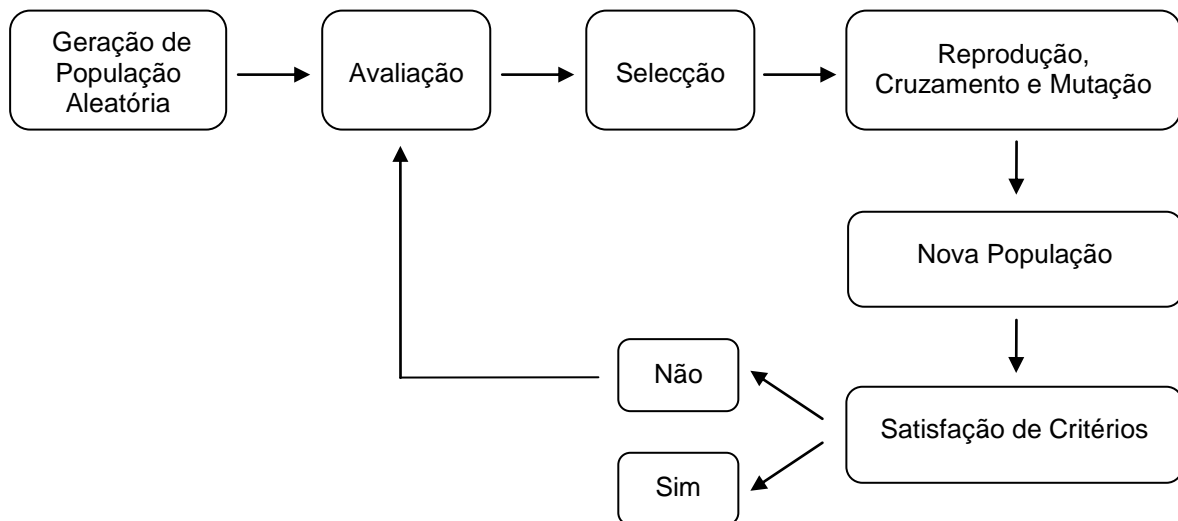


Figura 2.9 – Ciclo operacional de um Algoritmo Genético.

Os AG diferem dos outros processos de optimização pois: pesquisam uma população de soluções em paralelo ao invés de explorar uma solução; recorrem a regras de transição probabilísticas (denominados de processos estocásticos) e não determinísticas; requerem pouca informação acerca do problema de projecto.

Após de se ter definido o que é um SGP, discutido o seu impacto e utilidade metodológica e analisado os elementos que o compõem houve a necessidade de aprofundar o seu estudo ao comentar três exemplos, com o intuito de observar a sua aplicação prática, os seus contributos e a sua mecânica operacional. O próximo capítulo irá explorar cada um dos seguintes SGP: AudiOptimization, EifForm e Gene_Arch.

3. Análise Crítica de Três Sistemas Generativos de Projecto

No intuito de realizar um estudo mais profundo sobre Sistemas Generativos de Projecto (SGP) analisou-se em pormenor três exemplos. Pretende-se, através deste estudo, compreender a sua mecânica operacional, a sua aplicação e o impacto metodológico no desenvolvimento de projectos. Foram seleccionados três Sistemas Generativos de Projecto (SGP), todos relacionados com o meio construído e com o projecto de edifícios. Contudo cada SGP apresenta diferentes abordagens ao espaço e ao objecto arquitectónico focalizando a sua acção em diferentes campos. Os Sistemas Generativos de Projecto analisados são:

1) AudiOptimization – SGP, desenvolvido por Michael Monks no *Massachusetts Institute of Technology* (MIT). Este SGP pretende avaliar, reconfigurar espaços arquitectónicos, otimizando-os sob o ponto de vista acústico.

2) EifForm – SGP que gera e otimiza estruturas, tendo sido aplicado e testado na concepção de estruturas para torres, coberturas treliçadas e em cúpulas. Foi desenvolvido por Kristina Shea.

3) Gene_Arch – este SGP foi desenvolvido por Luisa Caldas, no MIT, e tem como objectivo a geração de espaços e soluções arquitectónicas otimizando-os sob o ponto de vista térmico e lumínico. Aplica conceitos de desenho bioclimático ao processo generativo, auxiliando o arquitecto a conceber edifícios mais sustentáveis, de reduzido consumo energético.

Pretende-se identificar as estratégias utilizadas por cada autor no desenvolvimento de cada programa, o funcionamento de cada sistema, o seu nível de utilização e de aplicação.

3.1 Audiooptimization

3.1.1 Abordagens à Simulação Acústica

Este SGP aborda o problema da acústica de espaços interiores. O projecto acústico é influenciado por múltiplos factores e grandezas estatísticas, muitas vezes contraditórios na sua aplicação. A natureza abstracta das grandezas acústicas, envolvidas na avaliação de um campo sonoro, tornam-as dificilmente tangíveis. Daí a necessidade de testar e de simular o comportamento acústico para se garantir a qualidade sonora dos espaços. Os especialistas na matéria recorreram sempre a modelos de simulação. Actualmente dois tipos de simulações são utilizados:

1) Construção de modelos físicos à escala – é a metodologia mais tradicional. Os testes podem ser efectuados sob o ponto visual e acústico. Visualmente podemos estudar a acústica de um espaço ao revestir o modelo com material reflectivo (por ex. espelhos) e posicionar vários lasers em diferentes locais no modelo avaliando, deste modo, a propagação e reflexão do som no espaço. Outro tipo de modelo consiste na reprodução mais aproximada possível dos materiais e na colocação de uma fonte sonora e de diversos receptores, devidamente escalados no tamanho e na frequência, no modelo à escala do espaço em estudo. Depreende-se que estes métodos de simulação e de análise

são: 1) pouco flexíveis – as alterações efectuadas num modelo físico à escala são limitadas sendo necessário recorrer a diversos tipos de modelos para se efectuar diferentes análises; 2) demorados na sua implementação; 3) dispendiosos – os materiais de simulação e avaliação para estes modelos, bem como a mão-de-obra necessária à sua elaboração implicam custos elevados. A acrescentar a esta lista de desvantagens estes métodos não são muito fiáveis, pois por diversas vezes foram responsáveis pela adopção de soluções inadequadas.

2) Simulação e Visualização Computorizada – através destes programas de computador podemos modelar um determinado espaço e avaliar o seu desempenho acústico através da visualização de diferentes análises acústicas. São fiáveis mas ainda se apoiam num processo iterativo de tentativa e erro. Estes algoritmos só processam uma solução espacial com a descrição completa dos parâmetros e elementos que a definem. É também da responsabilidade do utilizador humano elaborar uma avaliação e um juízo dos dados que a simulação lhe deu. Basicamente podemos resumir a utilização destes algoritmos no ciclo ilustrado no esquema da Figura 3.1.

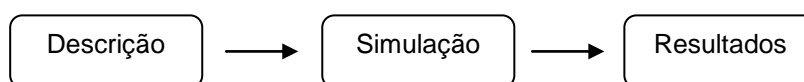


Figura 3.1 – Ciclo de utilização de algoritmos de simulação computorizada.

Para um problema multifacetado e complexo como o acústico, um processo apoiado na tentativa e erro é extremamente limitado, porque dificilmente permite explorar em tempo útil um número diversificado de hipóteses até se obter uma boa solução. Modificações ao projecto significam sempre um novo ciclo iterativo. As modificações adoptadas, com o intuito de melhorar a performance acústica, são única e exclusivamente baseadas no juízo crítico, do utilizador, sobre os resultados dados pela simulação. Isto limita a análise de várias opções de projecto, o que leva a que a solução escolhida dependa única e exclusivamente da interpretação humana da simulação corrente, apoiadas sempre no conhecimento técnico, experiência acumulada e intuição da equipa de projecto, o que leva a crer que muitas das vezes uma melhor solução poderia ser encontrada.

3.1.2 Abordagem do AudiOptimization ao Problema da Simulação e Optimização Acústica

O AudiOptimization aborda o projecto sob um ponto de vista invertido, aplicando o conceito de *goal oriented design*. Assim sendo neste SGP o utilizador estabelece primeiro as metas para o campo sonoro de determinado espaço para depois se conseguir criar interactivamente com o computador uma solução que atingisse ou se aproxima o mais possível dos objectivos previamente delineados (Monks et al., 2000: 77). Monks propõe então um programa que além de simular também optimiza, orientando o desenvolvimento do projecto para as metas previamente estabelecidas. O utilizador estabelece objectivos e o algoritmo, através de mecanismos de optimização, irá processar, dentro das restrições delineadas pelo utilizador, o espaço de solução do projecto para encontrar a configuração que mais se aproxima dos alvos inicialmente designados.

O processo de otimização de Monks é composto por duas fases distintas: uma que emprega uma otimização de carácter mais geral localizando uma solução ou soluções que tendem a aproximar-se dos objectivos traçados; outra que se foca sobre a amostra encontrada no primeiro passo e de uma maneira mais directa procura encontrar a solução que mais se aproxima das metas contempladas.

O algoritmo de Monks é composto por um motor de simulação aliado a um processo de otimização a técnicas de manipulação da forma e das matérias, baseadas na parametrização e discretização de diversas variáveis, permitindo abordar o problema do projecto acústico inversamente. De seguida apresentar-se-á as características essenciais destes componentes principais do algoritmo.

3.1.3 Modelo de Simulação

Pretende-se com esta expressão – modelo de simulação – designar os processos que pelos quais o algoritmo simula o campo sonoro de qualquer espaço tridimensional. O AudiOptimization usa como modelo de simulação o algoritmo *Monks Hybrid Simulation Algorithm*, previamente desenvolvido pelo mesmo autor (Monks et al., 2000: 81). Este algoritmo faz uma primeira aproximação ao modelar um campo de som inicial, depois simula, separadamente, um outro campo de som, recorrendo a um método diferente, para no fim de tudo combinar os resultados dos diferentes campos sonoros. O primeiro campo sonoro é modelado ao determinar a localização de todas as fontes sonoras virtuais até uma profundidade de reflexão do som, previamente especificada, calculando desta maneira os subvolumes, do espaço, influenciados por cada fonte sonora. O segundo campo sonoro baseia-se num modelo estatístico que considera só uma fonte sonora que distribui a energia sonora, enquanto decai, a todas as localizações de maneira igual. O campo sonoro final que o algoritmo produz nasce da combinação dos dois modelos simulados (Monks et al., 2000: 77-78).

Os resultados da simulação traduzem-se em visualizações tridimensionais do comportamento do espaço que representam a simulação de diferentes grandezas acústicas. Estas visualizações são utilizadas para, numa primeira fase, realizar uma análise do comportamento acústico do espaço e numa fase posterior na especificação dos objectivos de desempenho pretendidos.

No capítulo da definição do campo sonoro, o motor de simulação deste SGP aplicou o método aproximativo de Beranek, *Objective Rating Method* – ORM, que para abranger uma caracterização da impressão subjectiva do som recorre à análise de seis grandezas acústicas (Monks et al., 2000: 78):

1) Interaural Cross-Correlation Coefficient (IIACC) – caracteriza a sensação de envolvimento do receptor pelo som (Monks et al., 2000: 78).

2) Early Decay Time (EDT) – mede a reverberação de uma sala ou a sensação de “vivacidade” acústica de um espaço (Monks et al., 2000: 78).

3) Bass Ratio (BR) – indica a força de energia de baixa frequência (baixo) sobre a de média frequência. Sensorialmente pode ser descrito como a quantidade de calor de um som (Monks et al., 2000: 78).

4) Sound Level (G) – é o nível energético e de magnitude que um som possui no receptor. É esta grandeza que determina se o volume do som está alto ou baixo (Monks et al., 2000: 78-79).

5) Initial Time Delay Gap (Ti) – esta grandeza mede o tempo entre a chegada do som directo e da primeira onda reflectida ao receptor. A nível sensorial quantifica a percepção de intimidade sonora que o receptor sente no espaço. Esta grandeza acústica depende somente da geometria do espaço (Monks et al., 2000: 79).

6) Surface Diffusivity Index (SDI) – grandeza acústica que mede a quantidade de difusão do som causada pela rugosidade das superfícies. Correlaciona-se com a qualidade tonal do espaço (Monks et al., 2000: 79).

3.1.4. Processo de Optimização

O processo de optimização irá guiar o processo de reconfiguração do espaço para que este se compatibilize ao máximo com os objectivos delineados para o campo sonoro. São traçados objectivos para cada uma das seis grandezas acústicas supracitadas. O SGP, através da optimização sucessiva da configuração inicial, irá procurar dentro do espaço de solução, limitado pelas restrições impostas pelo utilizador, as soluções que mais se aproximam de tais metas.

Para que o campo sonoro inicial convirja para o campo sonoro objectivo é necessário que as propriedades materiais e geométricas deixem de ser dados fixos e adquiridos para serem parametrizáveis. Ao modificar as propriedades físicas da sala, seja no seu aspecto material e/ou geométrico emergem novas soluções de desempenho acústico diferente. Para que a optimização decorra é necessário definir uma função objectiva que irá analisar cada configuração e irá desempenhar um papel fulcral na selecção da melhor solução gerada pelo SGP. Devido à caracterização sonora através do modelo de Beranek a Função Objectivo aplicada neste SGP é a ORM. A função tem em conta os objectivos pretendidos para cada uma das 6 grandezas acústicas ao penalizar o desvio de cada uma delas em relação ao valor alvo e ao aplicar factores de ponderação normalizando a função (Monks et al., 2000: 80). A ORM permite avaliar a acústica de um espaço multifuncional que requer diversos desempenhos acústicos simultaneamente, ao somar as diferentes funções objectivas de cada uso associando a cada uma delas um factor de ponderação que determina a sua importância no desempenho acústico geral da sala (Monks et al., 2000: 80).

O resultado da função é uma espécie de “custo funcional” do espaço, quanto mais baixo este for melhor é o desempenho acústico, logo a optimização objectiva minimizar o valor da função do modelo inicial. Só se dá lugar à optimização quando o valor da função objectiva de determinada configuração é inferior ao valor da função objectiva da configuração anterior, até à estabilização do processo, ou seja até a determinação do valor mínimo. A melhor solução corresponde à configuração cujo valor da função objectiva é o menor. Como a função objectiva depende das restrições aplicáveis

às variáveis (geométricas e materiais) e como é de natureza composta a solução óptima não traduz necessariamente os melhores valores para todas as grandezas acústicas consideradas na ORM, porque são variáveis de efeito contrário. O resultado da optimização traduz-se naquela que possui um melhor desempenho, dadas as condicionantes, no cenário geral.

Foram utilizados duas técnicas de optimização. Uma, para a optimização de âmbito mais alargado através do algoritmo *Simulated Annealing* (que foi devidamente descrito na secção 2.3.3.1). Depois, a outra baseia-se nos valores obtidos anteriormente, i.e., sobre o valor da amostra encontrada na primeira fase de optimização, e aplica-se o algoritmo *Steepest Descent*. Esta optimização, faseada, é necessária devido ao carácter multifacetado da Função Objectivo, uma vez que existem diferentes mínimos para os diferentes aspectos que compõem a função objectiva (mínimos locais). O *Steepest Descent* é aplicado após se ter encontrado o ponto mínimo global do espaço de solução. A intenção é optimizar a solução que possui o mínimo global procedendo a passos sucessivos para seleccionar, entre as configurações “vizinhas” a que possui um melhor desempenho acústico. Este algoritmo utiliza uma abordagem mais local e concentrada sobre o valor mínimo global encontrado pelo *Simulated Annealing*, apoiando-se em vectores de optimização, que minimizam sucessivamente os diferentes parâmetros que compõem a ORM tendo em conta a vizinhança de valores de cada grandeza acústica (Monks et al., 2000: 83). Esta dupla optimização garante uma maior fiabilidade aos resultados proporcionados pelo AudiOptimization, porque discretiza a melhor solução dentro da vizinhança da melhor solução geral.

3.1.5 Implementação e Metodologia de Uso

Este SGP necessita sempre de um modelo espacial inicial, providenciado pelo utilizador (*input* humano), para poder proceder à sua optimização. Monks descreveu em traços gerais o processo metodológico de projecto adoptado por este SGP através do seguinte pseudo-código:

“Computação do campo sonoro base;

Estabelecer restrições, objectivos e parâmetros de optimização;

Repeat

 Invocar Simulated Annealing

 Invocar Steepest Descent

 Exibir resultados

 Modificar restrições, objectivos e parâmetros de optimização se desejado

Until convergir” (Monks et al. 2000: 81)¹⁰

Como se pode observar existem quatro momentos chave na implementação e utilização do algoritmo: 1) Simulação; 2) Definição de Restrições; 3) Definição de Objectivos; 4) Optimização.

1) Simulação – o campo sonoro do espaço, descrito no computador pelo utilizador humano, é simulado pelo algoritmo. O resultado traduz-se em visualizações para cada uma das grandezas

¹⁰ Traduzido directamente pelo autor da dissertação.

acústicas definidas no modelo estatístico de Beranek, a ORM. As visualizações são resultado da análise do impacto da propagação do som a partir de um impulso sonoro estelar (esférico omnidireccional) sobre uma grelha de pontos receptores distribuída uniformemente no espaço. Em cada ponto quantificam-se as acústicas. A simulação da configuração inicial revela ao utilizador as virtudes e deficiências do campo sonoro através de um conjunto de dados e de visualizações.

2) Definições de Restrições – existem dois tipos de variáveis: geométricas e materiais. A sua discretização permite gerar diferentes alternativas de solução. Para limitar e definir o comportamento do processo de optimização há que restringir o campo de alterações dessas variáveis. As restrições da seguinte maneira:

Restrições Geométricas – o utilizador impõe restrições geométricas às diversas entidades que compõem o modelo espacial recorrendo ao editor geométrico. O modelo espacial selecciona o componente; escolhe os tipos de transformações a aplicar – rotação, translação ao longo de um vector, variação de escala, etc. – e indica o intervalo (grau de liberdade do componente geométrico) ao posicioná-lo no limite mínimo e máximo, para cada operação geométrica que lhe pode ser imputável (Figura 3.2). (Monks et al., 2000: 81-82).

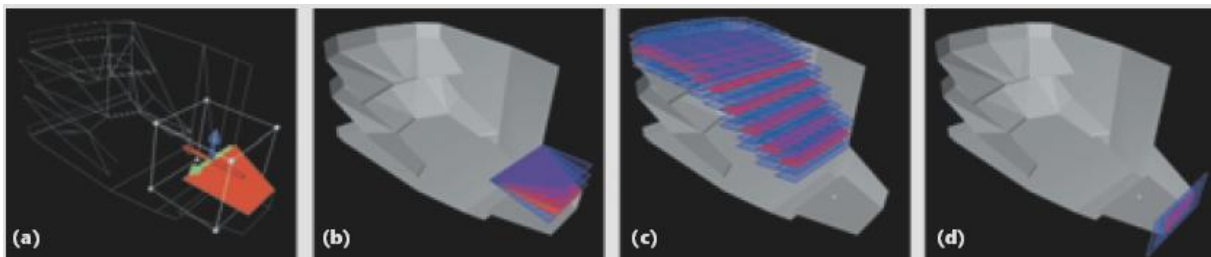


Figura 3.2 – Restrições geométricas: (a) referência da transformação; (b) restrição a uma rotação; (c) configurações possíveis resultantes; (d) restrição ao redimensionamento. Fonte: Monks et al., 2000: 82.

Restrições de Materiais – a partir do editor de material o utilizador escolhe o conjunto de materiais que se pode aplicar a determinado elemento geométrico (Figura 3.3) (Monks et al., 2000: 81)

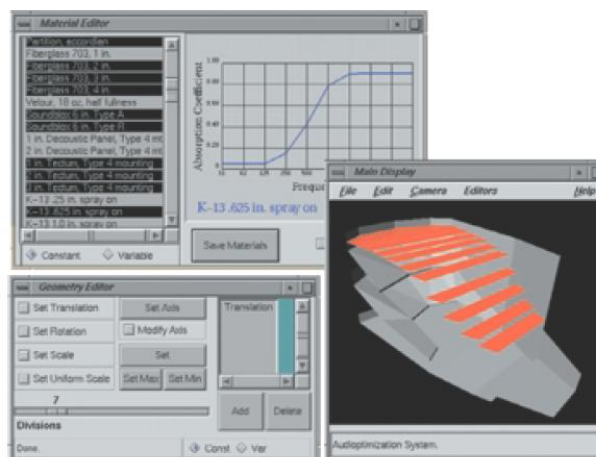


Figura 3.3 – Editor de Materiais e Editor Geométrico do AudiOptimization. Fonte: Monks et al., 2000: 82.

3) Definição de Objectivos – o utilizador define os objectivos para cada uma das grandezas acústicas contempladas na ORM, ao manipular directamente as visualizações sonoras (Figura 3.4) ou ao introduzir os valores pretendidos directamente para tais grandezas. Para os parâmetros acústicos, que variam consoante a posição, o projectista terá de manipular cada um dos pontos receptores (Monks et al., 2000: 82).

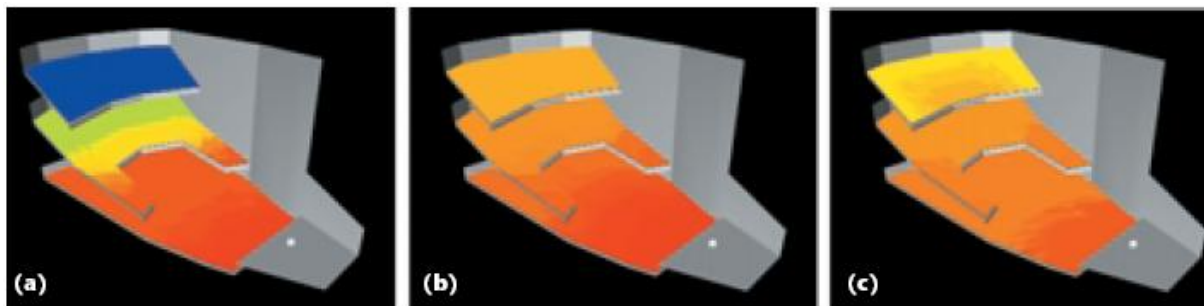


Figura 3.4 – Especificação do objectivo para o Nível Sonoro (G): (a) 80 ms; (b) 120 ms; (c) total (Monks et al. 2000: 82).

4) Optimização – Este aspecto foi devidamente aprofundado na secção 2.3.1.4. Contudo, convém reforçar que, para uma pesquisa da solução óptima mais eficiente, foi aplicada uma dupla optimização: uma de carácter mais geral, utilizando o algoritmo *Simulated Annealing*; e outra, que recai numa busca mais local, sobre a solução encontrada na primeira fase de optimização, recorrendo ao algoritmo *Steepest Descent*. Pretende-se, com este processo, não descurar a optimização de nenhuma grandeza acústica ao normalizar o processo de optimização tendo em conta os múltiplos factores a optimizar. De notar que o processo de optimização pode ser interrompido a qualquer altura para modificar objectivos, adicionar/subtrair variáveis a optimizar, modificar restrições e ajustar todos os parâmetros de optimização.

3.1.6 Aplicação Prática – Kresge Auditorium, MIT

O algoritmo foi aplicado ao Kresge Auditorium, um auditório multifuncional no MIT destinado a conferências e a concertos, tendo em vista a melhorar sua performance acústica. O auditório não possui elementos reconfiguráveis (passíveis de serem parametrizáveis) que possibilitem adaptar o espaço a diferentes requerimentos acústicos, o que implica que o objectivo do estudo seja mais orientado para a escolha dos materiais de revestimento. Em traços genéricos os principais defeitos acústicos do auditório são: reverberação excessiva para o discurso; a audiência não se sente rodeada/envolvida pelo som demonstrando um mau nível de IACC; o nível sonoro é bom mas a distribuição da sua energia é fraca para a inteligibilidade do discurso pois existe demasiada energia sonora a chegar demasiado tarde aos receptores.

O objectivo de Monks foi o de optimizar a acústica do auditório como um todo focando a função objectiva sob os dois usos principais do auditório, música sinfónica e discurso. A optimização combinou aspectos materiais e geométricos pela adição de alguns elementos que, apoiando-se na estrutura existente, pudessem melhorar o desempenho do espaço (Monks et al., 2000: 86).

Assim, a aplicação de materiais restringiu-se às bancadas, parede de fundo do palco e restantes superfícies que o conformam (concha acústica) porque, a simulação do modelo inicial permitiu verificar que o som reflectido incide demasiado sobre a plateia (Monks et al.: 88). O SGP atribuiu materiais absorventes aos assentos das bancadas e ao pavimento do palco e materiais reflectores na parede e restantes superfícies junto ao palco (Monks et al.: 88). Com estas pequenas alterações o valor de *Bass Ratio* (BR) atingiu, quase de imediato, o objectivo inicial estabelecido para aquele espaço. Os valores do *Surface Diffusivity Index* (SDI) e do *Early Decay Time* (EDT) melhoraram consideravelmente.

A alteração das variáveis geométricas consistiu no ajuste da profundidade da parede central do palco e na rotação de dois conjuntos de painéis reflectores sobre a área do palco. O SGP propôs a elevação do conjunto de painéis que se situavam mais longe da boca de palco e baixou os que se situam mais perto. por sua vez, a parede detrás do palco moveu-se para a frente, foi aproximada para junto da fonte sonora, de modo a tornar o espaço do palco mais contido (Figura 3.5).

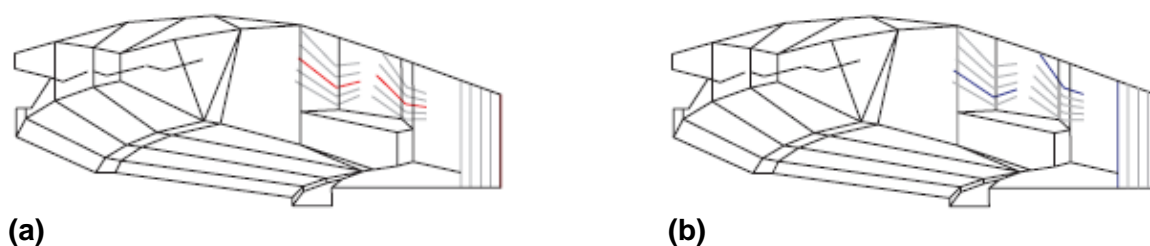


Figura 3.5 – Várias posições para os reflectores acústicos e para a parede detrás do palco: a) a vermelho a solução inicial; (b) a azul solução encontrada pelo algoritmo tendo em conta variáveis geométricas e de materiais. Fonte: Monks et al. 2000: 88.

Com estas alterações pontuais obteve-se um melhor valor do *Initial Time Delay Gap* (Ti) e o *Sound Level* (G) baixou cerca de 5 decibéis (db). Em paralelo observou-se que a distribuição temporal da energia sonora também melhorou, permitindo que uma maior percentagem de energia chegasse mais cedo aos receptores (Monks et al.: 89).

A optimização, a partir de uma amostra de 80 configurações possíveis, demorou cerca de 17 minutos a convergir para uma solução de melhoramento geral da acústica em 47,8% (Quadro 3.1), tendo em consideração os dois tipos de usos do auditório, nomeadamente palestras e música sinfónica,.

Table 2. Acoustic measure readings for Kresge Auditorium: speech and symphonic music.

	IACC	EDT (s)	BR	G (dB)	SDI	TI (s)	f(x)	Improvement (%)
Target	0.000	0.850	1.000	4.750	1.000	0.020	0.830	N/A
Initial Configuration	0.618	2.178	0.939	7.325	0.202	0.039	3.302	N/A
Final (materials only)	0.721	1.401	1.049	3.102	0.219	0.039	2.276	41.5
Final (geometry only)	0.537	2.098	0.945	7.364	0.202	0.028	3.054	10.0
Final (both)	0.592	1.479	0.973	4.989	0.198	0.028	2.234	47.8

Quadro 3.1 – Medições das grandezas acústicas para o Kresge Auditório (MIT, USA): Uso de Palestra e de Música Sinfónica. Fonte: Monks et al., 2000: 87.

3.1.7 Discussão

O SGP apresentado por Monks aposta num uso interactivo da ferramenta computacional ao abordar e resolver o projecto de acústica como um problema inverso e restrito. Esta aproximação apresenta-se como um método mais fácil, natural e fiável do que o típico ciclo de descrição – simulação – edição.

Da aplicação prática comentada podemos observar que o SGP obteve, de maneira rápida e eficaz, resultados muito satisfatórios. Muito dificilmente poderíamos, a partir do tradicional ciclo descrição – simulação – edição, avaliar uma amostra de configurações tão grande em tempo útil. Ao participar activamente no processo de projecto, a ferramenta computacional contribui para suprimir as limitações humanas. A configuração final apoia-se num processo estatístico, reforçando e legitimando a solução projectual como resposta a um problema, diminuindo o grau de arbitrariedade no processo de concepção técnica da solução.

Devido à complexidade enorme do projecto acústico de grandes salas de espectáculo, auditórios, espaços multi-usos, etc., os projectistas, normalmente, são compelidos a utilizar geometrias e um conjunto de materiais familiares com provas dadas, evitando assim potenciais erros graves. A aplicação deste SGP na fase de projecto pode dar mais liberdade ao projectista pois permite pesquisar, analisar e otimizar um maior número de formas e materiais, contribuindo, deste modo, no aprofundamento dos problemas intrínsecos à propagação do som (Monks et al., 2000: 89).

O elemento humano é extremamente valorizado na metodologia que este SGP proporciona. A interpretação que o utilizador faz dos resultados obtidos pelo programa é muito importante pois é a partir dela que se definem objectivos, seleccionam elementos de optimização, estabelecem graus de liberdade, através da manipulação de ferramentas paramétricas. O utilizador guia todo o processo, podendo intervir a qualquer momento para ajustar quaisquer parâmetros da optimização.

Conclui-se assim, que o conceito de *goal oriented design* define uma nova interacção entre homem e a máquina, baseada na reciprocidade e interactividade. Todavia Monks sugere dois melhoramentos: 1) a visualização do processo de optimização – que providenciaria uma percepção mais intuitiva dos mecanismos utilizados pelo SGP, do como e do porquê da convergência de certas soluções bem como uma representação multidimensional do espaço de solução do projecto possibilitando uma acção mais incisiva do utilizador sobre todo o processo (Monks et al., 2000: 90); 2) Identificação dos componentes que têm um efeito adverso no desempenho acústico global – esta visualização iria complementar a análise humana da simulação inicial, determinante na formulação do problema de optimização e na definição das variáveis e restrições a aplicar (Monks et al., 2000: 90).

3.2 EifForm

3.2.1 Aplicação de Sistemas Generativos de Projecto ao Estudo de Estruturas

A concepção de estruturas também é um dos campos para onde se desenvolveram alguns SGP destacando-se o EifForm, desenvolvido por Shea. O EifForm gera e otimiza um variado leque

de estruturas bidimensionais e tridimensionais, tão diversas como cúpulas, treliças, estruturas de transmissão vertical para torres, entre outras.

Existem actualmente simuladores avançados, como o ANSYS Structural (Fasoulaki, 2008: 23), que permitem a análise das estruturas mais simples até às mais complexas, cujo cálculo manual seria inconcebível em termos de esforço e de tempo. Contudo, estes simuladores, por muito sofisticados que sejam, possuem sempre uma participação passiva no desenvolvimento da concepção estrutural pois apenas simulam o desempenho de uma estrutura devidamente descrita e modelada pelo utilizador.

A aplicação de SGP no projecto digital de estruturas visa transformar o computador num colaborador activo no processo de concepção através da geração de conceitos, pertencentes a uma linguagem ou tipologia previamente estabelecida, estimulando-o a encontrar soluções para problemas de desempenho estrutural (Shea et al., 2005b), expandindo deste modo o número e o alcance das soluções viáveis para a resolução do problema estrutural em causa. A exploração directa do universo da solução é guiada por um processo de optimização orientado, desta forma, para o processo generativo que, por sua vez, se baseia em modelos estocásticos, de maneira a introduzir alguma aleatoriedade na geração de soluções. Esta ferramenta suporta assim uma exploração projectual neutral, imparcial e objectiva libertando o acto de concepção humano da influência dos habituais preconceitos e factores circunstanciais que influenciam na adopção de determinada configuração.

O EifForm não pretende substituir o projectista humano possibilitando até que a optimização dimensional de uma estrutura em concreto seja manipulada pelo utilizador. Aliás, a configuração inicial a partir da qual a geração de soluções se processa tem de ser sempre definida pelo projectista. O modelo de optimização e as restrições – geométricas e funcionais – são também de *input* humano. O desenvolvimento e optimização de diversos cenários, que satisfazem os objectivos e restrições do problema projectual, incentivam a própria criatividade humana pois, ao fornecerem novos dados e novas perspectivas sobre o objecto de estudo, aprofundam a consciência, a percepção e a compreensão do problema estrutural (Shea e Cagan, 1999). Este SGP complementa definitivamente as capacidades do projectista humano ao explorar o problema de modo objectivo, apresentando conceitos e soluções, alternativas e variadas, que dificilmente seriam obtidas manualmente.

3.2.2 Formulação do Problema no EifForm

A formulação do problema projectual consiste na descrição das condicionantes externas e, para além disso, das relações entre restrições e objectivos que definem as vontades e intenções do projectista. No caso das estruturas o problema é de análise geométrica e de desempenho físico dependendo, necessariamente, da forma e da escolha do tipo de material.

O EifForm requer a definição de: geometria; critérios que determinam a performance das estruturas; processo generativo, como forma de estabelecer a geração de diversas alternativas para o problema em questão; e de um modelo de optimização que guia o processo generativo tendo em conta a performance das estruturas encontradas. Assim sendo, no EifForm o problema projectual é definido a partir dos seguintes pressupostos:

1) Modelo Geométrico – este modelo inclui a descrição da geometria e da topologia (ou conectividade estrutural) de uma configuração inicial. Esta descrição é definida, por ex., através de um conjunto de pontos, linhas e superfícies modelados (Shea et al., 2005b: 255). Também se podem determinar limites à geometria, tais como a dimensão máxima de uma estrutura ou dos seus membros estruturais.

2) Modelos de Desempenho – aqui definem-se as restrições e parâmetros inerentes ao problema estrutural. Os parâmetros que determinam o comportamento físico da estrutura são descritos neste ponto, tais como cargas aplicadas, tipo de material, módulo de elasticidade entre outros (Shea et al. 2005b: 256). O modo como as sucessivas iterações são optimizadas também é determinado neste modelo ao recorrer, por exemplo, à descrição das variáveis, à caracterização da forma de comparação das soluções, à definição de regras de aceitação/rejeição de uma nova solução e ao peso da probabilidade que uma solução de pior desempenho possa ter ao vir a ser considerada no processo generativo. Os vectores a optimizar são, nomeadamente, a massa da estrutura, o seu custo, o nº de membros estruturais e a sua secção. A Função Objectivo e os critérios mínimos para validar a estabilidade da estrutura são também definidos neste modelo.

3) Modelo Generativo – determina os parâmetros generativos, as restrições paramétricas da gramática de forma estrutural e os parâmetros que controlam o processo generativo e de optimização (Shea et al., 2005b: 255). Os parâmetros generativos estabelecem limites às soluções geradas como, por exemplo, o nº máximo de elementos estruturais que poderão ter. As restrições paramétricas à gramática de forma são as que irão possibilitar a geração de soluções dentro de um mesmo espaço topológico. É na gramática de forma que se definem os parâmetros variáveis, isto é, os elementos geométricos e topológicos sujeitos a alterações, a caracterização e as limitações dessas mesmas alterações e o tipo de transformações aplicáveis. O comportamento dos parâmetros da gramática é responsável pela maior ou menor diversidade formal das soluções. Os parâmetros de controlo do processo generativo regem a derivação formal ao definir, por exemplo, o nº de iterações necessárias para o processo generativo parar.

3.2.3 Método Generativo e de Optimização

O EifForm aplica o processo generativo de optimização *Structural Topology and Shape Annealing* (STSA). O STSA resulta da síntese de diferentes técnicas computacionais integrando gramáticas de forma, concebidas especialmente para estruturas, como processo generativo; um modelo de avaliação de desempenho, normalmente o Método de Elementos Finitos que analisa as diferentes soluções no domínio do comportamento estrutural e da performance dimensional e por último técnicas de optimização estocástica recorrendo ao algoritmo *simulated annealing* que foi devidamente descrito na secção 2.3.3.1.

Na gramática de forma estabelece-se uma linguagem formal que define as estruturas, ao estabelecer as regras fundamentais para a geração de grupos, famílias ou mesmo espaços formais ao invés de estabelecer uma forma específica. O EifForm utiliza gramáticas de topologia triangular. O modelo de optimização quantifica e contrabalança os objectivos e as restrições viabilizando deste modo uma

optimização das diferentes formas geradas que vão ao encontro das directrizes definidas pelas circunstâncias inerentes ao problema e pelas que reflectem as intenções do projectista. Os seguintes passos ilustram de modo simplificado o funcionamento do método STSA aplicado pelo EifForm:

1) Uma estrutura inicial (Solução Corrente) é gerada através da conexão mais simples dos apoios e pontos de aplicação de cargas, especificados no problema projectual, através de elementos lineares ou membros estruturais;

2) A estrutura obtida é analisada recorrendo ao Método de Elementos Finitos (MEF). Obtemos desta análise dados referentes à Função Objectivo, como os valores das variáveis a minimizar (custo, peso próprio, volume, etc.) bem como valores que dizem respeito às restrições impostas ao problema, sejam eles de carácter dimensional ou de comportamento físico da estrutura.

3) Os valores da função objectivo da solução estrutural gerada bem como o cumprimento dos critérios de projecto são avaliados pelo modelo de optimização, via *Simulated Annealing*. Os parâmetros de avaliação e optimização são definidos pelo utilizador (que pode incluir modelos de comportamento estrutural, restrições geométricas, considerações económicas e estéticas). O *Simulated Annealing* aceita ou rejeita a configuração gerada.

4) Se a estrutura for aceite pelo modelo de optimização aplica-se nela uma regra ou um conjunto de regras de transformação definidas na gramática de forma para criar uma nova solução (Solução Nova).

5) Avalia-se o valor da Função Objectivo da Solução Nova.

6) O algoritmo *Simulated Annealing* compara o desempenho da Solução Corrente com a da Solução Nova. Se o desempenho da Solução Nova for melhor do que o da Solução Corrente, a nova estrutura é aceite e passa a ocupar o lugar da Solução Corrente repetindo-se consecutivamente os passos 4, 5 e 6. Se a solução nova possuir uma performance pior que a Solução Corrente pode não ser rejeitada. Ela pode ser transformada na Solução Corrente a ser optimizada, baseando-se numa função de probabilidade. Aplica-se esta técnica para alargar o espaço de pesquisa e a amostra de soluções, evitando a concentração da optimização em mínimos locais (Shea e Cagan, 1999: 7).

O processo de optimização pára até o número de iterações, previamente definido, chegar ao fim ou então convergir num mínimo global da Função Objectivo, conforme a Figura 3.6 ilustra.

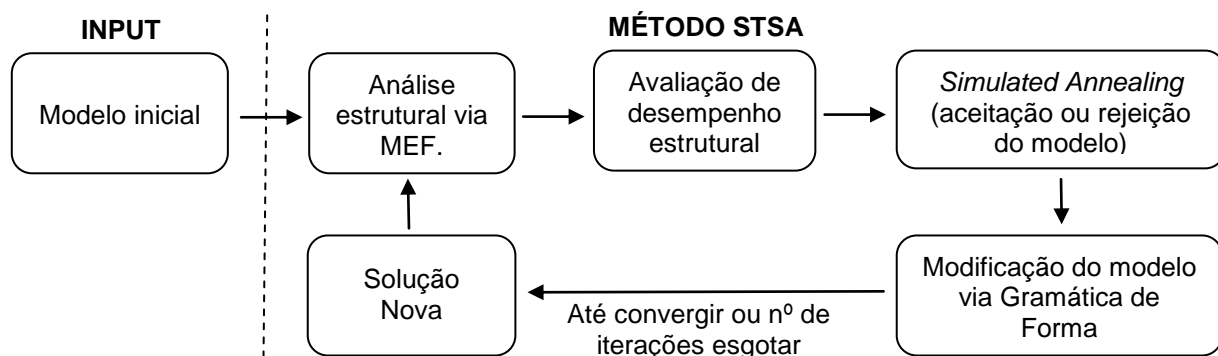


Figura 3.6 – Ciclo operacional do método STSA.

Esta técnica de optimização não garante que as soluções óptimas sejam encontradas. As alternativas detectadas são as melhores possíveis dentro das condicionantes e restrições definidas pelo problema.

O modelo generativo, as restrições e a gramática formal podem ser alteradas a qualquer momento para se proceder a novo ciclo iterativo de optimização. Esta flexibilidade permite a exploração de diversos cenários hipotéticos e diferentes topologias aplicáveis ao projecto em questão.

3.2.4 Integração do EifForm em Ambiente CA(A)D

A integração do EifForm com um programa de modelação paramétrica e associativa, Generative Components (GC), visa sobretudo superar as dificuldades de construção do modelo inicial que define o problema na sua vertente geométrica, generativa e de desempenho. O cruzamento de aplicações generativas com ferramentas paramétricas CAD permitem explorar, de modo interactivo, desafios de crescente complexidade com o intuito de melhorar a negociação entre diferentes interesses, vontades e disciplinas envolvidas na construção actual de edifícios.

O GC é um programa de modelação e visualização digital, baseado em grafos, que combina modelação paramétrica e programação. Foi concebido para providenciar uma série de ferramentas paramétricas para o Microstation e para o Triforma, programas CAD da *Bentley Systems*. O GC possibilita a parametrização total dos modelos tornando-os totalmente personalizáveis e reactivos a qualquer operação que se venha a efectuar sobre eles.

Aproveitando as capacidades de modelação e visualização do GC os modelos são desenvolvidos no GC e transferidos para o EifForm como ponto de partida para o processo generativo. O GC possibilita a visualização e manipulação das relações topológicas e geométricas que são fundamentais na modelação do problema a otimizar no EifForm. Aliás, até as soluções geradas pelo EifForm podem ser alvo de modificações através do interface de modelação topológica/geométrica do GC para serem sujeitas a novo processo generativo de optimização. A total parametrização dos modelos viabilizada pelo GC permite melhorar a exploração de estruturas inovadoras devido ao *feedback* dinâmico e reactivo existente entre as duas ferramentas. Se, por um lado, modificações realizadas ao modelo no GC significam uma alteração da optimização realizada pelo EifForm, por outro, o modelo inicial do GC actualiza-se através da incorporação das alterações que o método generativo do EifForm efectuou no seu processo de optimização.

Os dois sistemas são integrados via XML – eXtensible Markup Language. A linguagem XML adequa-se especialmente à troca de informações entre diferentes aplicações. Ao possuir os modelos XML dos dois programas bem definidos é relativamente simples estabelecer conversores entre os diferentes formatos, viabilizando assim a transferência de informação de um programa para o outro (Shea et al., 2005b: 256). O modelo XML do EifForm codifica quatro tipos de elementos:

1) Settings (Definições) – lista o nome das definições e os seus valores. As definições permitem o utilizador caracterizar o tipo de estrutura e de critérios limite à análise via MEF como por

exemplo: estados limites de tensão, tensão de rotura, deslocamento máximo permitido, etc. (Shea et al. 2005b: 256-257).

2) Structural Properties – aqui codificam-se as propriedades estruturais do modelo utilizado, (análise estrutural, propriedades dos materiais, tipos de cargas aplicadas, etc.) (Shea et al. 2005b: 257).

3) Obstacles – são obstáculos de natureza geométrica que definem o volume periférico onde as estruturas se podem circunscrever. (Shea et al. 2005b: 257).

4) Design – referencia e descreve a geometria do projecto inicial. É aqui que se referencia a posição do modelo a ser optimizado no GC, viabilizando a exportação dos elementos estruturais de um *software* para outro. Este modelo também importa para o EifForm o esquema topológico, isto é, os grafos de interdependências entre os diversos elementos geométricos do GC. As alterações propostas pelo EifForm modificam o esquema de grafos permitindo uma actualização da estrutura, no GC, aquando da exportação. (Shea et al., 2005b: 257).

O modelo XML do GC possui informação similar à do elemento *Design* do modelo XML do EifForm. Contudo a informação do modelo XML do GC funciona como um código que é executado sequencialmente produzindo um modelo simbólico e um gráfico interligado. Este modelo pode ser revisto e modificado no interface gráfico ou no simbólico, e ser exportado novamente para o EifForm para novo processo de optimização (Figura 3.7) incentivando a exploração de cenários múltiplos.

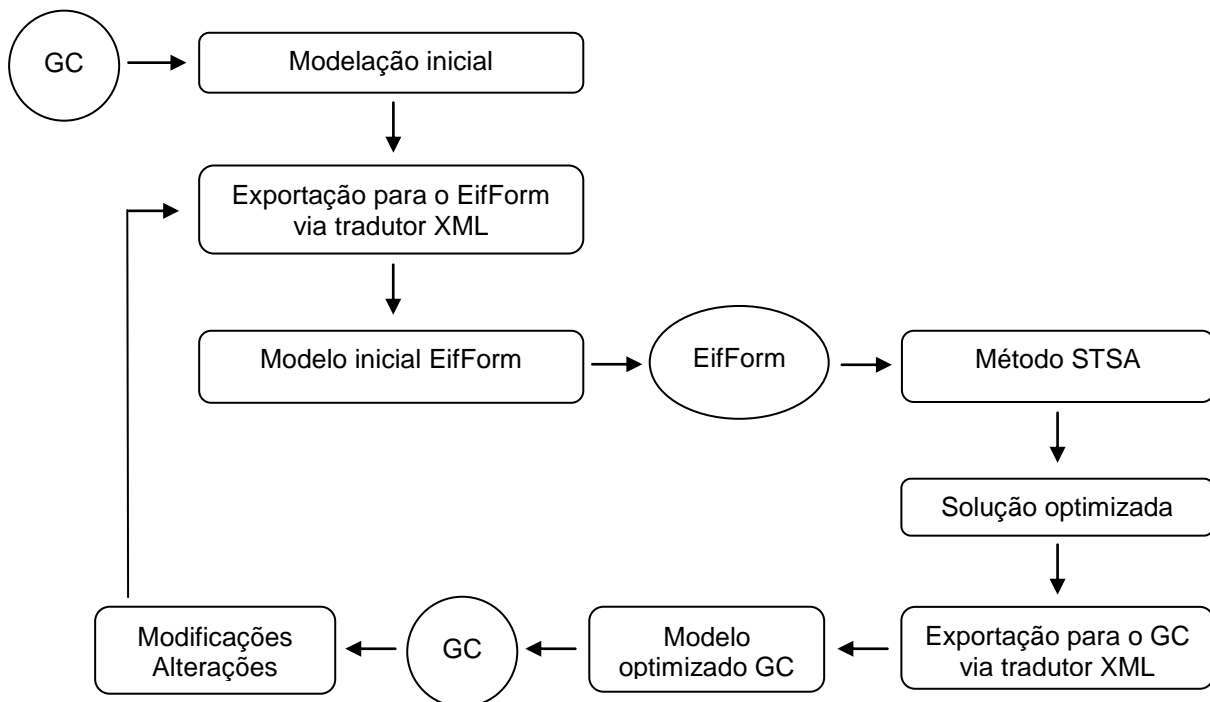


Figura 3.7 – *Feedback* dinâmico entre o GC e o EifForm via modelos XML.

A integração foi testada no projecto de 20 treliças tridimensionais para a cobertura de um estádio. O objectivo era optimizar as soluções reduzindo a sua massa. Devido à capacidade

paramétrica e associativa do modelo do estádio gerado em GC, quando se importaram as soluções obtidas no EifForm para o GC, a forma da cobertura foi actualizada automaticamente (Figura 3.8). Uma alteração *a posteriori* na forma da cobertura significa a alteração da forma das treliças e consequentemente uma nova optimização via EifForm. Fica assim claro que a integração destes dois sistemas possui a capacidade de explorar dinamicamente cenários alternativos. O *feedback* dinâmico criado entre os dois sistemas potencia a compreensão do impacto que modificações complexas da forma possuem no comportamento estrutural.

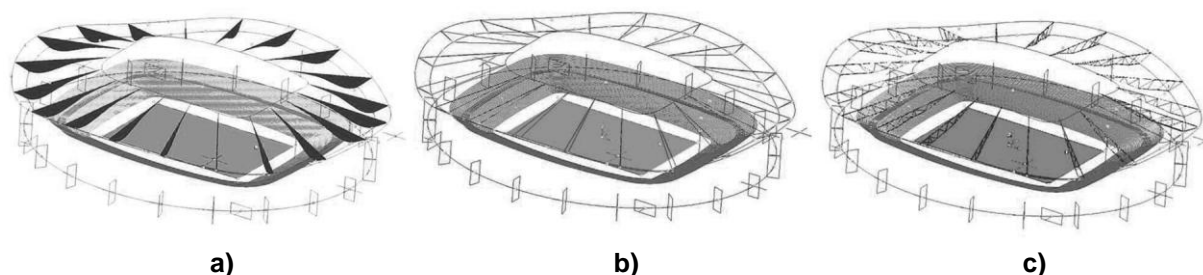


Figura 3.8 – Integração do EifForm com o GC na optimização da estrutura de uma cobertura de um estádio. a) modelo inicial no GC; b) modelo inicial de input para o EifForm; c) Treliças optimizadas pelo EifForm no contexto do estádio. Fonte: Shea et al., 2005b: 259.

Até aqui as considerações construtivas foram legadas por *input* humano. Todavia, a solução avaliada explora, ainda, a transição dos resultados obtidos em SGP para realidade construtiva, ao explorar processos de pormenorização paramétrica e métodos de prototipagem rápida (PR) e de pré-fabricação CNC (*Computer Numeric Control*) (Shea et al., 2005a)¹¹. Contudo, há que destacar a experiência efectuada no âmbito do *Hylomorphic Project* (Ahrens et al., 2006), onde se propôs uma estrutura, concebida com o auxílio do EifForm, para o pátio *Schindler* do *MAK, Center for Art and Architecture*, situado em *Los Angeles*, EUA (Figura 3.9).

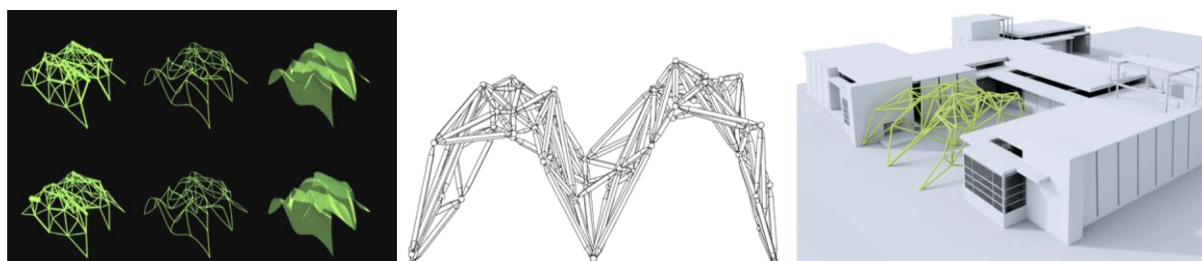


Figura 3.9 – *The Hylomorphic Project*. À esquerda: algumas das iterações produzidas pelo EifForm. Ao centro: solução final detalhada. À direita: vista aérea da estrutura no seu contexto. Fonte: Ahrens, Chandler et al. 2006.

¹¹ Como esta transposição não é fundamental para a compreensão deste SGP está detalhada no Anexo I.

3.2.5 Aplicação Prática – Optimização das Treliças de Cobertura da Zona Aquática do Centro Universitário da Carnegie Mellon University, Pittsburgh EUA

Para avaliar as capacidades do SGP o EifForm foi aplicado no projecto de uma estrutura de suporte de uma cobertura de uma piscina visando a optimização das estruturas propostas ao problema colocado: 1) por humanos e 2) pelo programa. A cobertura em estudo é a da zona aquática do Centro Universitário da Carnegie Mellon University (Pittsburgh, EUA). A estrutura existente consiste em oito treliças standard do tipo Warren invertidas (Shea e Cagan, 1999). O problema colocado consiste na elaboração de oito vigas treliçadas metálicas (aço estrutural ASTM-A36) iguais simplesmente apoiadas em duas paredes estruturais. A carga aplicada é uniformemente distribuída e traduz o peso próprio da cobertura e a sobrecarga da neve e da chuva (Figura 3.10).

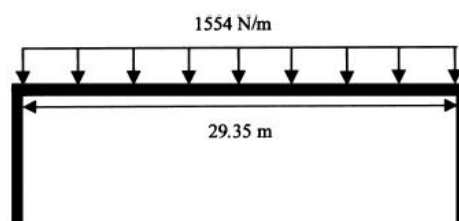


Figura 3.10 – Esquema do problema estrutural da cobertura da zona aquática do Centro Universitário de Carnegie Mellon University. Fonte: Shea e Cagan, 1999: 10.

Foram convidados seis projectistas para propor diferentes soluções, três arquitectos e três engenheiros. A aplicação do EifForm pretende minimizar a massa estrutural das treliças, cumprindo as restrições impostas ao desempenho da estrutura em termos de resistência, para a altura da treliça. No primeiro cenário de aplicação cada modelo geométrico definido pelos projectistas foi respeitado. O modelo generativo do EifForm contemplava três variáveis: 1) – Variação de dimensão dos membros; 2) Identificação de membros estruturais desnecessários ao desempenho estrutural; 3) Variação da posição dos nós da corda inferior da cobertura. Retiraram-se as seguintes conclusões:

1) Todas as treliças adoptaram uma forma de arco abatido invertido, de modo a reduzir a massa estrutural para o mesmo desempenho (Shea e Cagan, 1999: 13 – 14);

2) Numa das estruturas propostas por um engenheiro, o EifForm verificou que a solução possuía membros estruturais a mais (Shea e Cagan, 1999: 14);

No segundo cenário de aplicação do EifForm o método STSA foi utilizado para gerar alternativas. O modelo generativo e de optimização incorporaram critérios de projecto definidos pelos projectistas de modo a que o SGP propusesse soluções que reflectissem as suas preferências, ao mesmo tempo que cumpria as restrições funcionais do problema e minimizasse a massa estrutural (Shea e Cagan, 1999: 15). As soluções encontradas pelo EifForm possuíam uma qualidade similar. A maior diferença de massa observada entre estruturas foi de apenas 3,6% (Figura 3.11) (Shea e Cagan, 1999: 18-19).



Figura 3.11 – a) solução mais leve encontrada pelo EifForm sem restrição à altura da treliça (massa = 1417 Kg); b) solução mais pesada gerada pelo EifForm sem restrição à altura da treliça (massa = 1468 Kg). Fonte: Shea e Cagan, 1999: 17.

Do relaxamento ou aperto das restrições retiraram-se as seguintes relações:

1) Se não se restringir a altura o EifForm tende a gerar treliças que se afastam muito da linha de cobertura (Shea e Cagan, 1999: 19);

2) Quando a altura é restringida a massa tende a aumentar. Surpreendentemente, verificou-se que quando a altura é restringida a solução mais leve encontrada pelo EifForm é assimétrica em vez de ser simétrica, como se pode verificar na Figura 3.12. Levanta-se então a possibilidade, ao contrário do que se suponha em termos teóricos, de que as soluções assimétricas possuem melhores performances do que as estruturas simétricas (Shea e Cagan, 1999: 19);



Figura 3.12 – a) solução simétrica gerada pelo EifForm com uma restrição à altura da treliça a 1/6 do vão e com 7 pontos de apoio fixos para a carga da cobertura (massa = 1564 Kg); b) solução assimétrica concebida pelo EifForm para a mesma situação (massa = 1515 Kg). Fonte: Shea e Cagan, 1999: 18.

3) Fixar o número de nós em 7 pontos origina soluções mais leves (Shea e Cagan, 1999: 19).

4) Quanto maior o número de restrições geométricas aplicadas ao processo generativo (por exemplo: simetria, limitação à altura das treliças, espaçamento uniforme dos nós, tamanho uniforme dos membros estruturais, etc.) as formas tornam-se progressivamente mais simples até chegar à solução do tipo *Kingpost*. Quanto mais relaxadas forem as restrições mais complexa é a geometria (Figura 3.13) (Shea e Cagan, 1999: 19-20).



Figura 3.13 – À esquerda a solução mais complexa e à direita a configuração mais simples, do tipo *Kingpost*, obtidas pelo EifForm. Fonte: Shea e Cagan, 1999: 18.

O operador humano ao definir diferentes cenários para o problema em estudo, tira um maior proveito do método STSA como ferramenta exploratória de projecto. Observa-se que a aplicação do EifForm contribui efectivamente para a aquisição de novas ideias que complementam as convencionais. Certos pressupostos, acerca do comportamento das estruturas, foram postos em causa, como, por exemplo, a ideia de que estruturas simétricas possuem melhor desempenho do que as assimétricas. Ao comparar as soluções propostas pelos projectistas e as geradas pelo EifForm observa-se que o programa, além de propor soluções similares, exhibe outras que não tinham sido equacionadas pelos humanos, umas de carácter simples e outras de maior complexidade. Na optimização directa das estruturas propostas, as soluções tendiam para uma forma de arco abatido invertido. O EifForm demonstrou que outras formas, onde a corda inferior é horizontal, poderiam ser igualmente eficazes (Figura 3.14) (Shea e Cagan, 1999: 20).



Figura 3.14 – Soluções onde a corda inferior é horizontal. Fonte: Shea e Cagan, 1999: 17.

O EifForm também gerou soluções que vão ao encontro de pressupostos estabelecidos pelos projectistas mas com topologias formais diferentes e de massa inferior (Figura 3.15) (Shea e Cagan, 1999: 20).

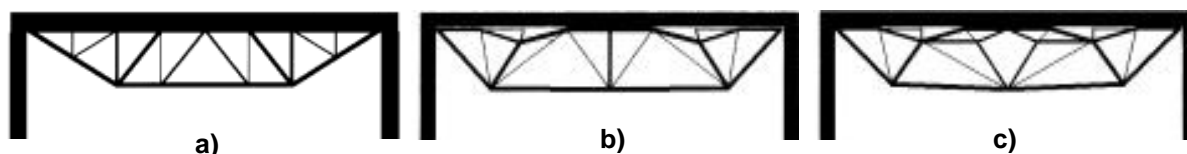


Figura 3.15 – a) treliça proposta por um dos projectistas (massa = 1932 Kg). As soluções propostas pelo EifForm: b) (massa = 1564 Kg) e c) (massa = 1640 kg). Fonte: Shea e Cagan, 1999: 16-18.

Ao gerar soluções inovadoras, devido à sua invulgaridade e expressividade formal, pode-se afirmar que esta ferramenta possui o potencial de enriquecer o “léxico” das estruturas utilizadas na construção. O SGP indica também caminhos inesperados que podem incentivar a redefinição da pesquisa espacial e formal, como a pista que deu em certas soluções de descolar a corda superior da treliça, da cobertura.

3.2.6 Discussão

O SGP, apresentado e desenvolvido por Shea, é uma ferramenta efectiva no auxílio ao desenvolvimento do projecto. O EifForm, ao apoiar-se em objectivos e direccionar o processo iterativo para a optimização das soluções redimensiona o papel do computador no processo de projecto, transformando a máquina num colaborador activo que providencia novas soluções que possivelmente não seriam contempladas com outros *modus operandi*.

Ficou demonstrado que o EifForm possui um largo espectro de utilização e aplicação no projecto de estruturas. O seu grau interventivo depende somente das directrizes que o utilizador determina na definição do problema. Verificou-se que o método STSA, utilizado pelo EifForm, é capaz de otimizar estruturas pré-concebidas bem como, gerar estruturas inovadoras tanto para problemas banais como para outros mais complexos. O método STSA gera facilmente um leque variado de soluções diferenciadas de desempenho estrutural similar. O único custo para o utilizador é a definição do problema, o tempo de computação e a avaliação dos resultados obtidos.

A utilização do EifForm contribui efectivamente para o aprofundamento do conhecimento do desempenho das estruturas, pois algumas das experiências indicaram soluções que dificilmente seriam contempladas por projectistas humanos e outras que desafiaram certos pressupostos teóricos pré-estabelecidos, nomeadamente que as estruturas simétricas possuem sempre melhor desempenho que as assimétricas.

Com a utilização deste SGP, o projecto não fica restringido somente à intuição do projectista. A exploração de múltiplos cenários é potenciada e, através da aplicação do método STSA, a selecção das diferentes soluções é mais sustentada e menos arbitrária. Ao integrar o seu SGP com diferentes programas, Shea pretende potenciar a sua aptidão generativa e ampliar a sua capacidade de aplicação ao torná-lo mais versátil e fácil de utilizar.

A utilização de modelos XML permitiu a integração do EifForm com o GC. Esta integração expandiu a capacidade de exploração de múltiplos cenários, aumentou a exploração da complexidade geométrica dos modelos e facilitou a integração do problema no EifForm. O *feedback* criado entre as duas aplicações viabilizou uma avaliação quase em tempo real (pois o único tempo que se despende é o da computação) do impacto estrutural e formal das diferentes variações paramétricas operadas nas diferentes alternativas exploradas.

3.3 Gene Arch

3.3.1 Aplicação de Sistemas Generativos de Projecto na Optimização Térmica e Lumínica do Espaço Arquitectónico

O conforto térmico e um bom índice de luminosidade são requisitos indispensáveis a um espaço agradável. Infelizmente, o consumo energético despendido para assegurar o conforto térmico e lumínico das nossas edificações contribui, em larga escala, para os actuais problemas energéticos e ambientais. O Gene_Arch, desenvolvido por Luísa Caldas (2001, 2008), é uma ferramenta computacional que pretende dar solução aos intrincados problemas da térmica e da iluminação na fase de projecto, focando o seu processo generativo na optimização das soluções sob o ponto de vista da sustentabilidade energética.

Para caracterizar e enquadrar o problema térmico e lumínico é necessário ter em conta diversos factores tais como: clima local, orientação do edifício, tipos de materiais utilizados e usos do edifício. O grau de complexidade das relações entre os diversos factores caracteriza o problema térmico e lumínico do espaço, como um problema de multi-critério de parâmetros conflituosos. As

opções de projecto possuem consequências e efeitos por vezes contraditórios, pois ao se melhorar um aspecto, os outros pioram. Caldas debate a complexidade do assunto enumerando diversos conflitos resultantes das consequências do dimensionamento dos vãos na térmica e na iluminação do espaço, (Caldas e Norford, 1999), da utilização de materiais que contribuem para um isolamento eficaz mas cuja fabricação implica um grande gasto energético e a emissão de gases de estufa (Caldas, 2002b) até ao impacto que as inclinações das coberturas possuem no aquecimento do espaço interior (Caldas et al., 2001). A dificuldade em dar resposta a este problema reside em encontrar o equilíbrio entre todos estes factores.

A complexidade do problema, oriunda de todos os factores supracitados, inviabiliza, em grande parte, a análise manual sendo necessário recorrer a algoritmos de simulação. As simulações computorizadas para a performance térmica e lumínica analisam e avaliam o desempenho do modelo arquitectónico a partir de modelos estatísticos rigorosos. Todavia a análise de cada cenário é um processo lento, pois as soluções para os problemas identificados são sugeridas e modeladas pelo operador humano o que reduz em muito as hipóteses de solução tidas em conta (Caldas e Norford, 1999: 251). O SGP sugerido por Caldas opõe-se ao método iterativo, resultante do uso de softwares de simulação, ao aplicar o conceito de projecto orientado por e para objectivos – *goal oriented design*. Assim sendo, o Gene_Arch aplica o seu método generativo realizando uma pesquisa extensiva, tendo em conta as restrições impostas pelo utilizador, para encontrar o conjunto de soluções que apresentem o melhor desempenho energético (térmico e lumínico). A optimização das soluções é obtida através de alterações ao modelo inicial de forma a maximizar o uso da luz natural, reduzindo o consumo de luz artificial, e minimizar as necessidades de consumo energético destinadas para o aquecimento e arrefecimento dos espaços. O Gene_Arch realiza estes objectivos ao dimensionar as fenestraçãoes de fachada (Caldas e Norford, 1999), ao modificar os materiais aplicados (Caldas, 2002b) e ao alterar a forma tridimensional do objecto arquitectónico (Caldas, 2002a e 2003), de modo simultâneo ou isolado, no seu processo generativo.

Este SGP integra simultaneamente Algoritmos Genéticos (AG) e um simulador de análise ambiental, o DOE2.1E. Os AGs funcionam como mecanismos de apoio à geração formal mas sobretudo de pesquisa e optimização evolucionária das soluções, enquanto que o DOE2.1E funciona como o módulo de análise térmica e de iluminação (Caldas, 2006: 109) possibilitando a simulação das diversas soluções. O Gene_Arch foi inicialmente concebido para ser usado desde fases intermédias a tardias do projecto. Todavia, as competências que o SGP ganhou na manipulação da forma tridimensional (Caldas, 2002a) possibilitaram também a sua aplicação em fases iniciais do projecto pois ao propor volumetrias mais eficientes em termos de desempenho energético, sugere hipóteses emergentes com alto potencial de desenvolvimento.

3.3.2 Método de Simulação Térmica e Lumínica – DOE.2.1 E

O *software* de simulação térmica e lumínica DOE 2.1 E foi escolhido como motor de simulação do Gene_Arch porque, além de ser fiável, rigoroso e rápido, tem a particularidade de

incorporar simultaneamente a análise da térmica e da iluminação (Caldas et al., 2001: 1), os dois factores que este SGP pretende melhorar para promover um uso energético mais sustentável.

Este simulador enquadra rigorosamente o modelo em estudo no sistema climático determinado pela sua localização, através de ficheiros TMY – *Typical Metereological Year*. Os dados que se podem retirar de uma análise realizada pelo DOE 2.1 E, dizem respeito à iluminância, às temperaturas interiores, considerando o peso e o papel de compensação efectuado por diversos sistemas eléctricos e mecânicos e ao gasto energético que esses sistemas possuem para garantir os critérios térmicos e lumínicos estabelecidos. Para avaliar o desempenho energético, Caldas aplicou, na maior parte dos casos, os dados resultantes da análise térmica e lumínica do DOE 2.1 E necessários ao cálculo do Consumo Energético Anual. Esta grandeza permite avaliar quais os consumos energéticos que uma solução arquitectónica necessita, para garantir os graus de conforto térmico e lumínico ao longo de todo o ano, e permite comparar o desempenho de diferentes soluções. Contudo, o uso desta grandeza levanta o problema da escala pois um edifício mais pequeno, na maioria dos casos, consome menos do que um edifício maior, mas isso não significa necessariamente um melhor desempenho energético. Para se poder comparar soluções de escalas diferentes, Caldas propõe o uso de outra grandeza, a Intensidade Energética, que, resumidamente, estabelece o Consumo Energético por unidade de área (Caldas, 2002a e 2005). Assim sendo, a função objectivo do Consumo Energético Anual é suficiente para avaliar a optimização de um modelo bem definido cujas variações geométricas e espaciais não possuam um impacto relevante¹², enquanto que a Intensidade do Uso Energético é indicada em casos onde a liberdade de manipulação da forma do SGP é maior pois é muito provável que o processo generativo conceba soluções de diferentes tamanhos. O procedimento de cálculo e factores tidos em conta nas simulações térmicas realizadas pelo DOE 2.1 E das diversas soluções concebidas durante o processo generativo está devidamente documentado no Anexo II.

3.3.3 Método Generativo

O objecto arquitectónico inicial é modelado no Gene_Arch, e pode ser modificado através de dois tipos de variáveis: 1) Variáveis Independentes – cuja discretização é determinada pelo utilizador mas o valor é gerado automaticamente; 2) Variáveis Dependentes – resultantes do comportamento e das relações entre variáveis independentes. Os diferentes valores gerados para cada uma das variáveis pelo AG vão necessariamente gerar diferentes soluções arquitectónicas.

Para definir a parametrização torna-se então necessário construir um ficheiro que define um modelo inicial básico, a partir do qual se podem derivar todas as hipóteses. Para compreender a concepção do modelo inicial tome-se como exemplo as seguintes situações de variação formal de duas salas adjacentes (sala 1 e sala 2), conforme descrito (Caldas 2002a):

1º Caso – o comprimento e a largura das salas são variáveis. Isto permite que a parede interior, que delimita as duas salas, se prolongue para o exterior (Figura 3.16). Quando tal acontece, o

¹² Como é o caso da optimização do posicionamento e dimensionamento dos vãos de fachada da Torre H da Faculdade de Arquitectura da Universidade do Porto (Caldas et al., 2001).

mesmo plano geométrico possui duas naturezas construtivas, a parede interior e a parede exterior. Como o DOE faz distinção entre estas duas naturezas construtivas ter-se-á de contemplar a existência destas paredes exteriores (Caldas, 2002a: 6).

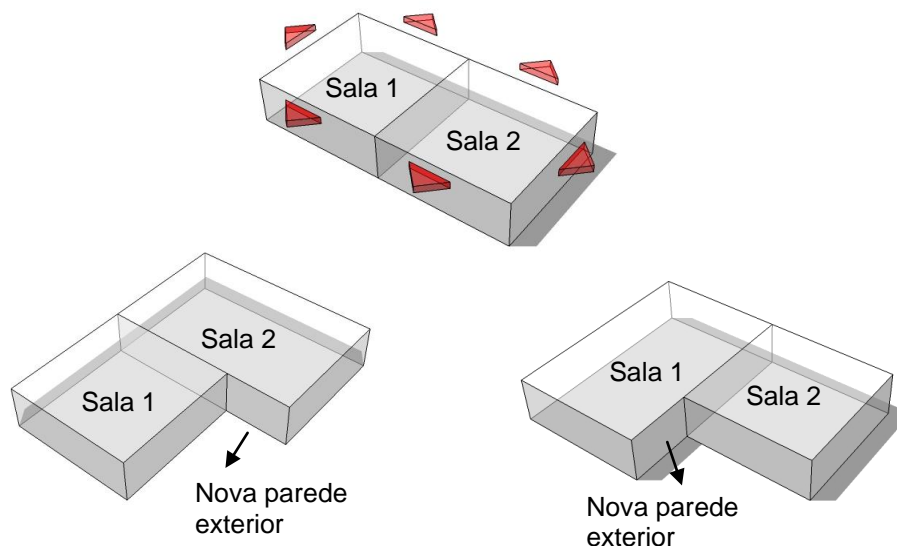


Figura 3.16 – Ocorrência de novas paredes exteriores no processo generativo de um caso de duas salas adjacentes cujo comprimento e largura são variáveis.

2º Caso – a Figura 3.17 retrata este caso onde o comprimento, a largura e a altura das salas é variável. O problema das paredes adjacentes complica-se pois para cada sala existem quatro possibilidades de surgirem novas paredes exteriores em relação ao padrão básico conforme está documentado na Figura 3.17 (Caldas, 2002a: 7). O ficheiro de *input* inicial terá de prever para a sala 1 do 2º piso as paredes exteriores E1 e E2.

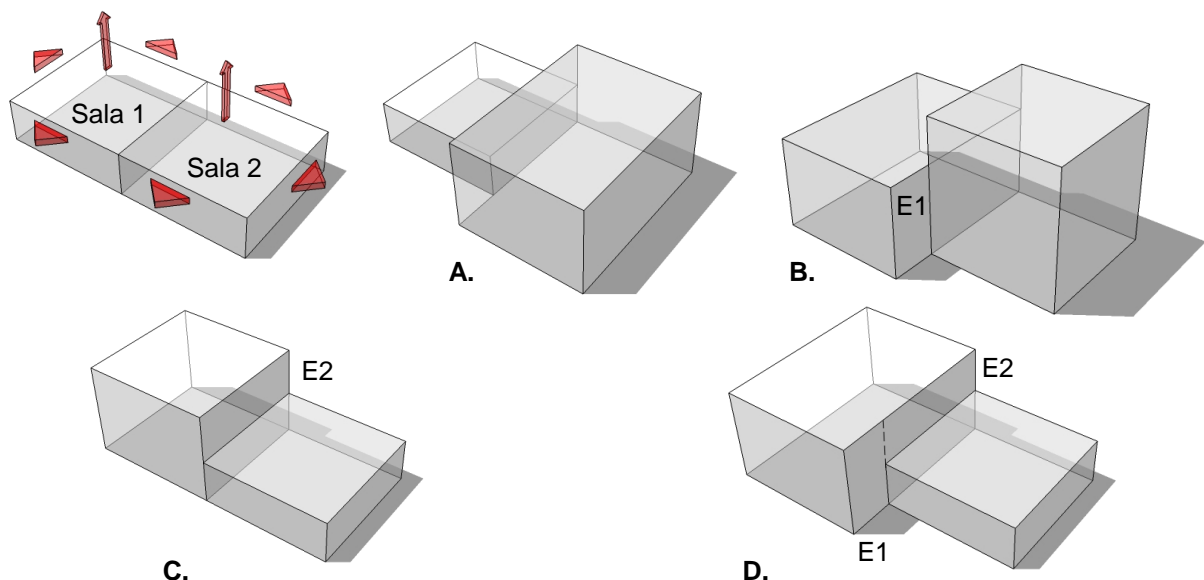


Figura 3.17 – Paredes exteriores possíveis para a sala 1: A – nenhuma parede exterior surge; B – surge uma parede exterior vertical (E1); C – surge uma parede horizontal (E2); D – surge uma parede exterior na forma de “L” que terá de ser decomposta na sua parte vertical (E1) e na sua parte horizontal (E2).

Após ter previsto as diferentes possibilidades de transformação geométrica a partir do comportamento dos parâmetros variáveis gerais do caso de estudo, define-se o ficheiro inicial. A partir deste esqueleto poder-se-á descrever com mais clareza o número, a natureza e o comportamento de todas as variáveis necessárias ao fornecimento dos dados fundamentais na modelação dos diferentes espaços. Das experiências realizadas (Caldas 2002a) foi possível estabelecer um protocolo de parametrização, essencial na construção analítica do caso de estudo, constituída pelas seguintes etapas:

- 1 – Definição do Padrão Básico/Modelo Inicial;
- 2 – Identificação e definição do comportamento dos parâmetros variáveis do Padrão Básico;
- 3 – Avaliação do impacto geométrico que os parâmetros variáveis possuem no Padrão Básico;
- 4 – Definição do ficheiro que codifica o modelo inicial contemplando as transformações possíveis de ocorrerem;
- 5 – Identificação final do número e tipo das variáveis necessárias à descrição dos espaços;
- 6 – Programação do comportamento das diversas variáveis.

3.3.4 Método de Optimização

O Gene_Arch recorre à Algoritmos Genéticos como métodos de optimização evolucionários no intuito de incentivar a pesquisa de respostas diferenciadas dentro do universo de soluções para o problema que lhe é colocado. Um Algoritmo Genético é uma técnica computacional de pesquisa global que se baseia em noções Darwinísticas, tais como a sobrevivência do mais apto e da selecção natural (Caldas e Norford, 1999: 251; Daru e Snijder, 1997: 139 e 146). A mecânica operacional deste método de optimização está descrita no capítulo 2 na secção 2.3.3.2. No entanto, é preciso sublinhar que a aplicação de AG no Gene_Arch transvaza o objectivo de optimização pois o método generativo utilizado baseia-se na parametrização do código que define a estrutura base do modelo inicial. Os AG suportam a parametrização através da determinação do valor de variáveis independentes. É devido a este factor que se pode afirmar que a parametrização no Gene_Arch é de alto nível caracterizando o processo generativo como muito autónomo e quase automático (o utilizador só terá de codificar o comportamento dos parâmetros variáveis) comparando com processos de parametrização realizados passo a passo como o do AudiOptimization (Monks et al., 2000).

Foram testados e aplicados alguns Algoritmos Genéticos e estratégias de optimização na construção e desenvolvimento do GENE_ARCH com o intuito de se encontrar métodos de optimização cada vez melhores e mais adequados. Podemos agrupar as diferentes estratégias de desenvolvimento e refinamento deste SGP em 2 fases:

1ª fase – Micro Genetic Algorithm (MicroGA) e Standard Genetic Algorithm (AGS)

O *Micro Genetic Algorithm* (MicroGA) foi desenvolvido por Krishnakumar em 1989 (*cit. in* Caldas e Norford, 1999: 253). Este AG começa por usar uma pequena população para avaliar/seleccionar um indivíduo. De seguida, gera uma nova população onde imprime nos seus indivíduos os valores da solução encontrada na geração anterior. A este processo dá-se o nome de elitismo (Caldas e Norford, 1999: 253).

O MicroGA foi aplicado num caso muito simples onde foi possível calcular a melhor solução manualmente (Caldas e Norford, 1999: 254). A Função Objectivo a minimizar foi aplicada ao Consumo Energético Anual. Verificou-se que a optimização efectuada pelo MicroGA resultou, na maior parte dos casos, no mínimo global calculado manualmente, o que levou a concluir que os MicroGA são algoritmos adequados em processos de optimização (Caldas e Norford, 1999: 256). Em diferentes testes isolados para o mesmo problema, o algoritmo encontrou soluções diferentes o que demonstra claramente que existem diferentes configurações, próximas da ideal, para responder ao mesmo problema (Caldas e Norford, 1999: 260). Após ter obtido resultados muito satisfatórios com a aplicação do MicroGA ao Consumo Energético Anual, a autora prosseguiu o desenvolvimento do seu SGP adoptando o *Standard Genetic Algorithm* – Algoritmo Genético Standard (AGS).

O procedimento do AGS é o descrito na caracterização realizada para o método adoptado pelos AG. Tal como o MicroGA o AGS só procede à optimização generativa aplicando um critério de desempenho. As Funções Objectivo que se adoptaram foram a do Consumo Energético Anual (KWh/ano) e a da Intensidade do Uso Energético (KWh/m²) visto que eram as que melhor sintetizavam os vários aspectos do desempenho ambiental térmico e lumínico.

2ª fase – Algoritmo Genético do tipo Pareto (AGP)

Todas as estratégias adoptadas anteriormente não lidavam com problemas optimização com diferentes critérios pois não era possível avaliar numa única frente de resultados diversos critérios de desempenho. Os métodos comuns de optimização aplicados a problemas multi-critério consistem na aplicação de factores de ponderação, a cada um dos critérios de desempenho,. Este método aproximativo é um pouco redutor pois depende demasiado dos factores de majoração ou de minoração atribuídos (Caldas, 2002b). O objectivo em problemas de multi-critério é encontrar a melhor solução entre cedências múltiplas e compromissos existentes entre os diferentes factores (*trade-off*). Para abordar problemas multi-critério, onde na maior parte das vezes os factores geram conflitos entre si, Caldas (2002b) aplica o método de optimização Pareto. Os Algoritmos Genéticos do tipo Pareto (AGP) providenciam frentes de solução que traduzem os melhores compromissos entre os diferentes critérios de desempenho, tendo em conta a degradação de alguns para benefício do conjunto. As soluções que caracterizam a frente pareto nunca são as de melhor desempenho em todos os aspectos do problema porque o melhor desempenho de um aspecto implica, normalmente, que outros piorem a sua performance. As soluções apresentadas por AGP uniformizam o

desempenho de todos os critérios a otimizar, ao contemplar os seus diferentes *trade-offs*, para obter o melhor desempenho global¹³.

Caldas testou a aplicação do Gene_Arch em diversas experiências que consistiam em problemas multi-critério. Uma das experiências visava a optimização das dimensões dos vãos exteriores tendo em conta o impacto ambiental e os seus custos na selecção de materiais de construção, para um modelo simplificado de um piso de escritórios (Caldas, 2002b). Para este primeiro caso foram definidas três funções-objectivo: 1) Custo inicial da construção; 2) Consumo Energético Anual; 3) Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential* - GWP¹⁴) dos materiais. Os testes foram efectuados para climas diferenciados para se estudar como o GENE_ARCH define estratégias para o mesmo problema em circunstâncias diferentes. A autora conseguiu vislumbrar e compreender os diversos mecanismos de compensação utilizados pelo algoritmo para contrabalançar os diferentes factores em conflito.

Outra das experiências consistia na maximização do aproveitamento da luz solar e na minimização do consumo de energia utilizada para aquecer os espaços, através da manipulação da forma (Caldas, 2005). Utilizou-se a função-objectivo Intensidade do Uso Energético para se poder comparar volumetrias de diferentes tamanhos e formas. O caso de estudo consistia num edifício de escritórios simplificado de 2 pisos e 4 espaços adjacentes por piso situado num clima frio (Chicago, EUA). Os resultados possibilitaram identificar as estratégias utilizadas para adaptar a forma arquitectónica ao clima onde se insere. A fronteira das soluções de Pareto vão desde as formas longas e estreitas (melhor comportamento lumínico e pior térmico) a outras mais compactas (piores colectores solares mas mais eficientes do ponto de vista térmico). Entre estas a frente Pareto apresenta uma grande variedade de soluções de compromisso que representam os melhores *trade-offs* para o problema em questão. A análise comparativa destas soluções possibilitou a compreensão dos mecanismos inerentes aos *trade-offs* entre forma e desempenho energético¹⁵.

Pelas experiências efectuadas depreende-se que a exploração de múltiplos critérios para a resolução dos problemas térmicos e lumínicos guiados por preocupações ambientais é de tal ordem complexa que é quase impossível para o utilizador humano ter em conta todas as interacções e relações envolvidas. Nesse ponto a aplicação de AGP mostrou ser bastante eficaz na optimização de problemas multi-critério.

Após ter analisado o modelo de simulação e o modelo de optimização pode-se afirmar que o Gene_Arch é uma ferramenta computacional que inverte o tradicional ciclo, Modelação – Simulação – Alteração, dos algoritmos de simulação. Tendo em conta os objectivos, o algoritmo pesquisa as diversas soluções para o problema através da manipulação da forma, da fenestração e da materialidade arquitectónica. O funcionamento deste SGP é resumido no ciclo apresentado na Figura 3.18.

¹³ A definição do método Pareto e o procedimento de integração no Gene_Arch é aprofundado no Anexo III.

¹⁴ Potencial de Aquecimento Global (GWP) é um índice utilizado para quantificar a contribuição de diferentes gases para o aquecimento global. GWP é um rácio de retenção da radiação UV na atmosfera resultante da emissão de um quilograma de um gás de estufa comparada com a mesma quantidade de emissão de dióxido de carbono. O GWP é calculado para um intervalo de tempo fixo. Definição traduzida e parafraseada a partir da definição de GWP patente no site: http://www.eia.doe.gov/glossary/glossary_g.htm

¹⁵ Este teste prático da aplicação de AGP no Gene_Arch e os seus resultados estão devidamente comentados no Anexo III.

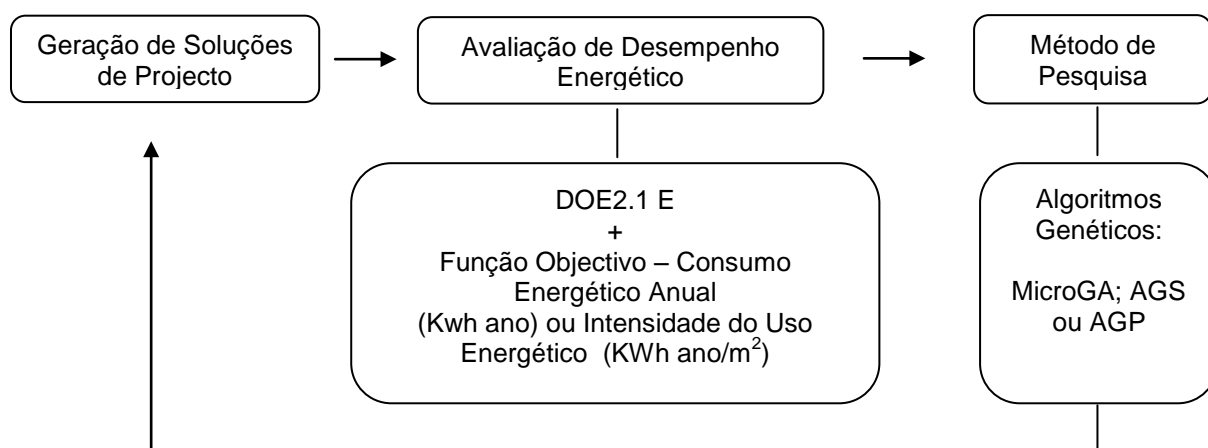


Figura 3.18 – Ciclo operacional do Gene_Arch. Este ciclo é repetido até se atingir o limite de gerações definido pelo utilizador.

3.3.5 Aplicação Prática do Gene_Arch na Optimização do Desempenho Energético da Torre H da Faculdade de Arquitectura da Universidade do Porto (FAUP)

Esta aplicação prática exemplifica a capacidade do Gene_Arch de incorporar intenções arquitectónicas a partir do estabelecimento de regras e restrições ao processo generativo de um edifício em particular. Este exemplo foi fundamental ao desenvolvimento do caso de estudo desta dissertação que pretende estender as capacidades de parametrização do Gene_Arch, do caso particular de um edifício, a uma tipologia ou *corpus* arquitectónico. Deste modo, efectua-se uma análise a partir de um edifício existente, em que a técnica de parametrização aplicada ao seu processo generativo é do tipo analítico. Caldas também aplicou métodos de parametrização originais ao estudar a incorporação de AGP no Gene_Arch para otimizar um edifício de escritórios imaginário através da sua manipulação formal (Caldas, 2005). Conforme já foi referido, esse caso está aprofundado no Anexo III.

A Torre H da FAUP situa-se na cidade do Porto, Portugal. Este edifício foi seleccionado porque, para além de albergar estúdios que necessitam de um grande controlo da luz natural, possui também uma grande variedade de fontes de luz, tais como vãos de janelas de diferentes orientações e proporções, uma *loggia* a sul e clarabóias (Caldas et al., 2001:2). O Gene_Arch foi aplicado ao dimensionamento e posicionamento dos vãos de fachada, das palas sombreadoras exteriores e da forma das clarabóias do último piso com o intuito de melhorar o desempenho energético do edifício utilizando o AGS como método de optimização e de apoio ao processo generativo. O objectivo, ao aplicar o Gene_Arch a este edifício, era avaliar a capacidade do SGP em incorporar intenções arquitectónicas de modo a que as soluções geradas se identificassem com a linguagem definida pelo arquitecto. A função-objectivo utilizada foi o Consumo Anual de Energia. À partida, percebia-se que um dimensionamento mais equilibrado dos vãos exteriores iria melhorar o aproveitamento da luz natural, e simultaneamente controlar o desempenho térmico e energético, quer no verão (arrefecimento), quer no inverno (aquecimento). O problema foi concebido tendo em conta as seguintes condições:

1) O nível de iluminância requerido para os estúdios e espaços de trabalho é de 500 lux e para as áreas de serviço é de 150 a 300 lux (Caldas et al., 2001: 2);

2) O sistema de iluminação artificial implementado no DOE 2.1 E é um sistema de regulação automática onde a luz artificial vai aumentando de intensidade à medida que é necessária para cumprir os níveis de iluminância determinados para cada tipo de espaço (Caldas et al., 2001:2);

3) A discretização da variação dimensional das janelas foi de intervalos de 30cm (Caldas et al., 2001:2); e as dimensões das palas de sombreamento exterior foi de 50 em 50cm (Caldas et al., 2001: 2);

Para que as intenções arquitectónicas fossem embebidas no processo generativo, algumas regras da análise efectuada foram explicitadas a cada alçado, tais como eixos composicionais das diferentes fachadas, proporções dos vãos, atribuição de tipos específicos de vãos a determinados compartimentos, etc. As regras determinam restrições aos parâmetros variáveis definindo intervalos de pesquisa para cada variável (Caldas et al., 2001: 2). Os eixos de composição de alçado bem como os intervalos de variação dos vãos de fachada estão ilustrados na Figura 3.19.

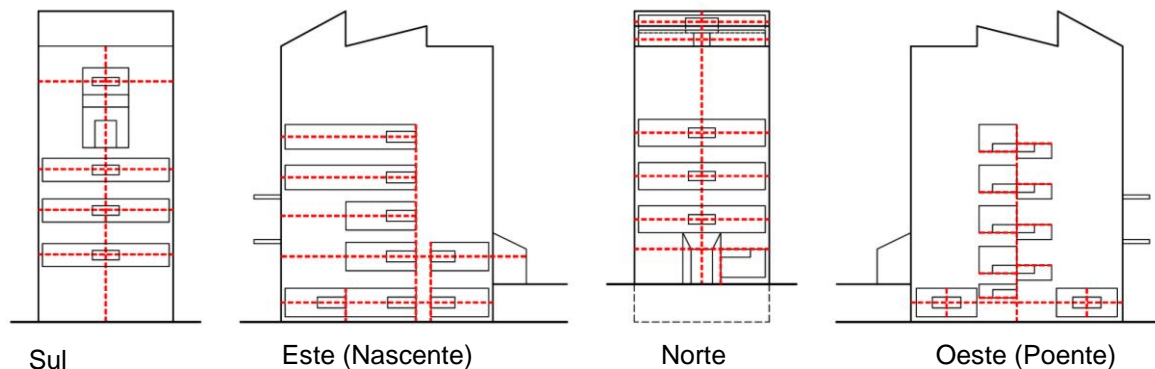


Figura 3.19 – Eixos de composição, marcados a vermelho, dos alçados da Torre H da FAUP e a variação máxima (rectângulos maiores) e mínima (rectângulos menores) para cada vão (Caldas, et al. 2001: 3).

Os resultados obtidos pelo Gene_Arch foram comparados com a solução original retirando-se as seguintes elações:

- Na fachada Norte as janelas horizontais geradas, de tamanho considerável, são muito semelhantes às originais (Figura 3.20). Isto acontece porque, tendo em conta o clima da cidade do Porto, as perdas térmicas não são significativas comparadas com o ganho e uso da luz natural (Caldas et al., 2001: 2);

- Na fachada Poente, onde a maior parte das áreas de serviço se encontram, o SGP optou por janelas de dimensão ainda mais reduzidas em relação às originais (Caldas et al., 2001: 3) (Figura 3.21);

- Na frente Sul o SGP realizou as modificações mais significativas. No 2º e 3º piso o algoritmo propõe, quando lhe é permitido, uma redução substancial da profundidade das palas de sombreamento (de uma profundidade original de 2m passam a 0,5m). No caso da profundidade da pala de sombreamento ser fixa o Gene_Arch aumentou ligeiramente as fenestraçãoes horizontais

(Caldas et al., 2001: 3). Conclui-se que as palas originais estão sobredimensionadas bloqueando a recepção de uma quantidade considerável de luz solar que reduziria o uso da iluminação artificial e aumentaria ganhos solares directos para o aquecimento do espaço;

- O 4º e 5º piso têm de ser analisados conjugando a frente Sul com a fachada Nascente pois ambos os pisos possuem estúdios que estão expostos a essas orientações. Em relação à proposta original o Gene_Arch aumentou os vãos orientados a Sul e reduziu as janelas viradas a Este (Figura 3.22) porque a exposição a Nascente é muito desfavorável devido aos ganhos solares excessivos nas manhãs de Verão (o que sobreaquece o espaço) e aos reduzidos níveis de luz natural durante a maior parte do ano (o que obriga a um gasto energético acrescido para iluminação e aquecimento) (Caldas et al., 2001: 3-4);

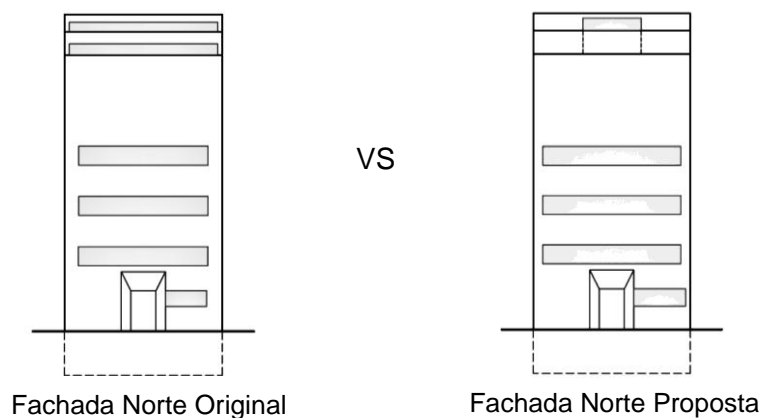


Figura 3.20 – Semelhança das janelas horizontais originais (à esquerda) e propostas pelo Gene_Arch (à direita), no alçado Norte (Caldas et al., 2001: 3).

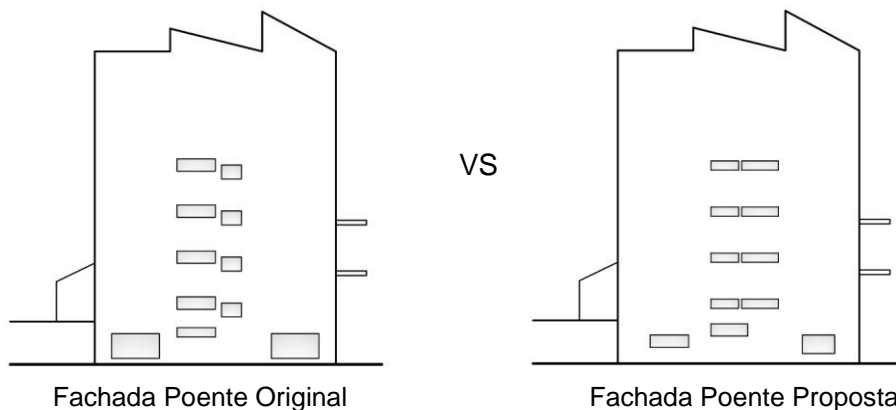


Figura 3.21 – Na Fachada Poente o Gene_Arch reduziu e realinhou as janelas – à direita – em relação ao alçado existente – à esquerda. Fonte: Caldas et al., 2001: 3.

- Na fachada Sul do 6º piso o Gene_Arch aumenta ao máximo a *loggia* exposta a Sul. Esta estratégia é adoptada porque a clarabóia mais próxima da *loggia* está virada a norte sendo responsável pela perda significativa de calor no Inverno. Assim sendo, o aumento das aberturas a Sul permite reduzir as dimensões dos envidraçados na clarabóia Norte sem perder muita luz natural. Por

seu lado a clarabóia mais distante da *loggia* assume as maiores dimensões possíveis porque nessa área não existe nenhuma fonte de luz natural alternativa (Figura 3.23) (Caldas et al., 2001: 3).

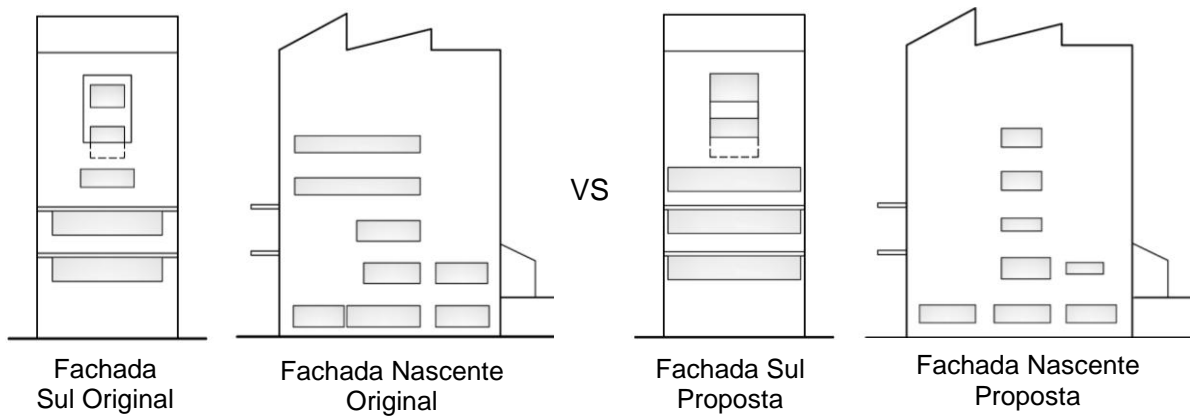


Figura 3.22 – Aumento da dimensão dos vãos a Sul e diminuição dos vãos a Nascente efectuado pelo Gene_Arch em relação ao original. Fonte: Caldas et al., 2001: 3.

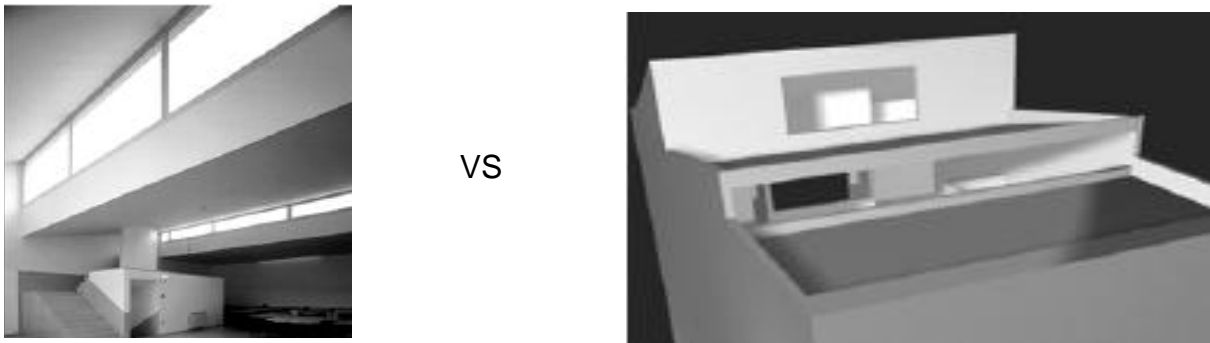


Figura 3.23 – Clarabóias existentes, à esquerda, e propostas pelo Gene_Arch, à direita. Fonte: Caldas et al., 2001: 3.

- Quando é permitido ao SGP manipular a forma das clarabóias verificou-se que a solução difere da que se pensaria que seria a melhor, tendo em conta os dados recolhidos das experiências anteriores, conforme se pode verificar na Figura 3.24.

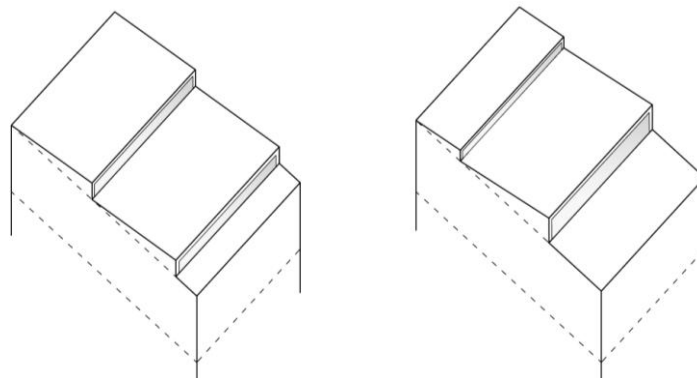


Figura 3.24 – Hipótese inicial para a geometria da clarabóia de melhor desempenho (à esquerda) e a melhor solução para o desenho da clarabóia encontrada pelo Gene_Arch (à direita). Fonte: Caldas et al., 2001: 6.

O Gene_Arch tanto gerou soluções semelhantes ao edifício original¹⁶ como adoptou soluções divergentes. Em nenhum dos casos as soluções geradas devem ser entendidas como desenhos de arquitectura de um edifício, mas acima de tudo como indicações de diagnóstico dos pontos fracos do projecto existente. Cabe ao arquitecto procurar a melhor forma de enquadrar este diagnóstico numa solução final de projecto. De qualquer modo, as estratégias diferiam à medida que se dava mais ou menos liberdade de manipulação ao SGP. As soluções propostas pelo Gene_Arch possuem uma performance mais eficiente sobretudo no capítulo da iluminação natural e aquecimento do espaço. Essa melhoria prende-se com as alterações introduzidas na fachada Sul (Caldas et al., 2001:7). Fica demonstrado que os problemas térmicos e lumínicos são de natureza tão complexa que é difícil prever qualquer impacto de alterações projectuais *a posteriori*, mesmo conhecendo de antemão os dados de testes anteriores, legitimando a aplicação de SGP na sua resolução.

3.3.6 Discussão

O Gene_Arch aplica o conceito de *goal oriented design*, invertendo assim o ciclo tradicional dos simuladores computadorizados que se baseiam em ciclos iterativos de tentativa e erro. Ao ser capaz de incorporar intenções arquitectónicas reais consegue assumir diferentes abordagens estilísticas ao mesmo tempo que apresenta resultados fiáveis. A emergência de soluções diversificadas com um desempenho energético otimizado comprova que existem diferentes maneiras, dentro de um discurso arquitectónico coerente, de solucionar problemas complexos de térmica e de iluminação.

A aplicação deste SGP é bastante diversificada comprovando a sua flexibilidade na resolução dos complexos problemas da térmica e da iluminação do espaço. Pode ser aplicado na optimização de elementos muito particulares como vãos de fachada, sistemas de sombreamento, composição construtiva de paredes, como na geração de formas tridimensionais complexas.

Após diversas experiências foram seleccionados dois tipos de AG como modelos de optimização: o AGS e o AGP. O primeiro é sobretudo vocacionado para a optimização de um só parâmetro de desempenho e aplica-se especialmente em casos muito concretos e definidos, que não requerem grandes alterações. O AGP é destinado a resolver problemas multi-critério sendo aplicado em casos onde o SGP possui uma maior liberdade de explorar soluções que operam transformações de maior impacto ao modelo inicial. O recurso ao simulador térmico DOE 2.1 E confere uma grande fiabilidade e robustez na análise das soluções geradas.

Na aplicação prática abordada, o Gene_Arch demonstrou que é possível embeber conceitos e ideias arquitectónicas no método generativo. Ao respeitar parâmetros e restrições, que obrigavam a que as soluções se mantivessem dentro do mesmo registo arquitectónico, o Gene_Arch apresentou soluções que evocavam opções patentes no projecto mas gerou outras que diferiam do projecto original, concluindo-se que a interacção dos diversos elementos do problema térmico e lumínico é de tal modo complexa que o desenvolvimento manual de respostas é limitado. A aplicação e desenvolvimento deste SGP torna-se então útil para a concepção de espaços cada vez mais sustentáveis e para a compreensão do impacto do problema térmico e lumínico no consumo

¹⁶ O que comprova uma incorporação eficiente das intenções e estilo arquitectónico do edifício.

energético dos edifícios, auxiliando efectivamente os projectistas a optarem e a redefinirem as estratégias a aplicar em cada projecto.

3.4 Síntese

Após o estudo mais detalhado destes três SGP foi possível realizar uma síntese esquematizada de cada um presente no quadro 3.2 (ver página seguinte).

QUADRO SÍNTESE DA ANÁLISE DOS TRÊS EXEMPLOS DE SISTEMAS GENERATIVOS DE PROJECTO – SGP –							
SGP (Autor)	OBJECTIVO	MODELO DE SIMULAÇÃO	MODELO GENERATIVO	MODELO DE OPTIMIZAÇÃO	FUNÇÃO OBJECTIVO	ÂMBITO DE APLICAÇÃO	TESTES PRÁTICOS ANALISADOS
AudiOptimization (Monks)	Optimização do desempenho acústico dos espaços, através da alteração formal e material	Monks Hybrid Simulation Algorithm	Parametrização manual (discretização passo a passo) das variáveis.	1ª Fase – Simulated Annealing; 2ª Fase – Steepest Descent	Object Rating Method - ORM	Espaços interiores desde salas comuns, de conferências até às de espectáculos e concertos.	Kresge Auditorium, MIT, EUA
EiffForm (Shea)	Concepção e optimização de estruturas sob diferentes critérios de desempenho.	Método de Elementos Finitos (MEF)	Gramáticas de forma concebidas especialmente para estruturas.	Método STSA - Standard Topology e Simulated Annealing	Desde de critérios económicos - redução de elementos estruturais - até visuais.	Todo o tipo de estruturas desde cúpulas, treliças, estruturas para Torres	Estrutura para a cobertura da zona aquática da CMU, EUA; e para um estádio; Hilomorph Project, MAK Center, EUA
Gene_Arch (Caldas)	Concepção de soluções arquitectónicas optimizadas no seu aspecto térmico e lumínico para um melhor desempenho energético.	DOE 2.1 E	Parametrização através de AG	MicroGenetic Algorithm (MicroGA) ou Algoritmo Genético Standard (AGS) ou Algoritmo Genético Pareto (AGP)	Consumo Energético Anual (Kwhano) ou Intensidade do Uso Energético (Kwhano/m ²)	Manipulação formal, dos materiais e da composição dos alçados de todo o tipo de edifícios	Torre H da FAUP

Quadro 3.2 – Quadro síntese da análise dos três exemplos SGP estudados.

4. Caso de Estudo: Parametrização Analítica de uma Casa Pátio Marroquina

4.1 Introdução

O caso de estudo apresentado pretende exemplificar o modo como um arquitecto pode manipular um SGP através da elaboração de regras e restrições que codificam intenções arquitectónicas de natureza complexa.

Conforme anteriormente mencionado, a dissertação retoma as questões abordadas no contexto da colaboração, enquanto bolseiro de investigação, no projecto *“Integrating Shape Grammars and Genetic Algorithms in a Generative Design System: Applications to a New Architectural Curriculum”* (POCTI/AUR/42147/2001 - ver Nota de Rodapé 1, pág. 18). A pesquisa previamente elaborada integrou Gramáticas de Forma com Algoritmos Genéticos. Esta integração visava utilizar gramáticas de forma como sistemas generativos a utilizar pelo Gene_Arch, um SGP que recorre a AG como processo de optimização evolutivo (Caldas, 2006)¹⁷. O estudo propõe um modelo generativo das casas-pátio de Marrakech baseado em parametrização. Pretende-se estabelecer uma metodologia para a elaboração de regras de parametrização, que sejam capazes de traduzir uma sintaxe arquitectónica complexa a partir de um corpus estilístico existente, e avaliar como a utilização de SGP pode produzir *feedbacks*, de natureza dinâmica e criativa, na fase de projecto. O Gene_Arch é particularmente interessante porque, além de permitir a manipulação formal e o teste de diversas disposições construtivas e esquemas compositivos de alçado, direcciona o processo evolutivo na busca de soluções com melhor desempenho energético, tendo em conta deste modo o aspecto sustentável da construção, factor determinante e essencial na arquitectura contemporânea. A metodologia elaborada permitirá expor de como se pode conceber um sistema arquitectónico através de um conjunto de relações, aplicando a afirmação desenvolvida por Stiny (1989: 137), *“Designs belong to relations”* e que a definição de restrições não limitam a capacidade criativa mas caracterizam relações de dependência complexas que concorrem para a geração de casos emergentes, conforme Kilian argumenta (2006: 300).

O objecto em estudo é a Casa Pátio da Medina de Marrakech. A existência de um *corpus* arquitectónico devidamente levantado e documentado, aquando do Projecto de Investigação, permitiu a identificação de regras implícitas que traduzem próprias desta arquitectura. A exploração de uma arquitectura vernacular é interessante, do ponto de vista da implementação no Gene_Arch porque, se por um lado, o modelo arquitectónico é rico na sua composição formal e organização topológica, por outro, contém em si estratégias bioclimáticas testadas e sedimentadas durante séculos. A implementação de tal processo generativo no Gene_Arch contribuirá efectivamente para o aprofundamento do conhecimento que possuímos deste tipo de arquitectura, quer seja pela identificação de estratégias de projecto mais adequadas a implementar, quer por uma leitura contemporânea e actualizada das mesmas.

Este tipo de abordagem, aplicado a arquitecturas de génese vernacular, concorre para o enriquecimento da cultura arquitectónica. Ao aliar técnicas de computação a tradições construtivas

¹⁷ Ver capítulo 3, secção 3.3 - Gene_Arch, da presente dissertação.

seculares, produzindo um *feedback* sobre as mesmas, capacitamo-nos cada vez mais para a concepção de novos modelos de habitação que respeitam um determinado contexto cultural e geofísico. Deste modo, a tradição arquitectónica e cultural é preservada ao mesmo tempo que se introduzem novos requisitos e maneiras de habitar contemporâneas.

Também digno de nota é a avaliação do contributo que os SGP podem trazer na resposta, com qualidade, à encomenda em determinados cenários. Por exemplo, no caso específico em estudo verificou-se um aumento da população em Marrakech nas últimas décadas, bem como em quase todas as cidades do Norte de África e do Médio Oriente, o que tem provocado uma enorme pressão urbana ditada pela necessidade de novas habitações (Duarte et al., 2007). A qualidade do espaço arquitectónico interior das casas degradou-se à medida que o crescimento urbano descontrolado aumentava. Os novos bairros e ambiente urbanos, decorrentes de tais expansões populacionais, não possuem a riqueza espacial encontrada nos bairros históricos de Marrakech. A implementação de técnicas computacionais generativas poderá assistir os arquitectos a conceber casas pátio em série sem perder a riqueza morfológica e qualidade espacial encontrada nos exemplos que constituem o corpus. Com a ajuda de SGP os profissionais de projecto poderão dar uma resposta em tempo útil à quantidade enorme de encomenda originada pelo crescimento populacional destas cidades. Viabiliza-se deste modo a implementação de projectos pensados, personalizados, dentro do mesmo registo estilístico, preservando a coerência do conjunto, e mais sustentáveis.

4.2 Trabalho Precedente

O trabalho realizado no âmbito do Projecto de Investigação é uma referência fundamental para esta dissertação. Um dos objectivos desse trabalho era desenvolver duas Gramáticas de Forma Paramétricas (Duarte e Rocha, 2006; Duarte et al., 2007), uma urbana e outra a nível das Casas Pátio. Isto obrigou à realização de duas análises distintas: ao tecido urbano, e à arquitectura das casas pátio. No decorrer do desenvolvimento do trabalho elaborado nessa fase foi observado a necessidade de desenvolver uma terceira gramática de forma, denominada de gramática de negociação. Ir-se-á comentar o trabalho desenvolvido no que diz respeito às análises efectuadas e às gramáticas de forma elaboradas.

4.2.1 Enquadramento Urbano

Devido a trabalhos antecedentes, o foco de estudo recaiu sobre o bairro, *Zaouiat Lakhdar*, na Medina de Marrakech. O bairro *Zaouiat Lakhdar* (Figura 4.1) é um dos mais antigos da Medina e encontra-se bem preservado. A vida urbana que possui parece capitalizar aspectos fundamentais que justificam essa preservação como a segurança, vida comunitária activa e bem-estar económico (Duarte et al., 2007: 325). Além disso este bairro sugere um corpus estilístico coerente com grande riqueza e variedade arquitectónica o que levou a ser o modelo de estudo sobretudo para a análise urbana e da gramática de forma correspondente.

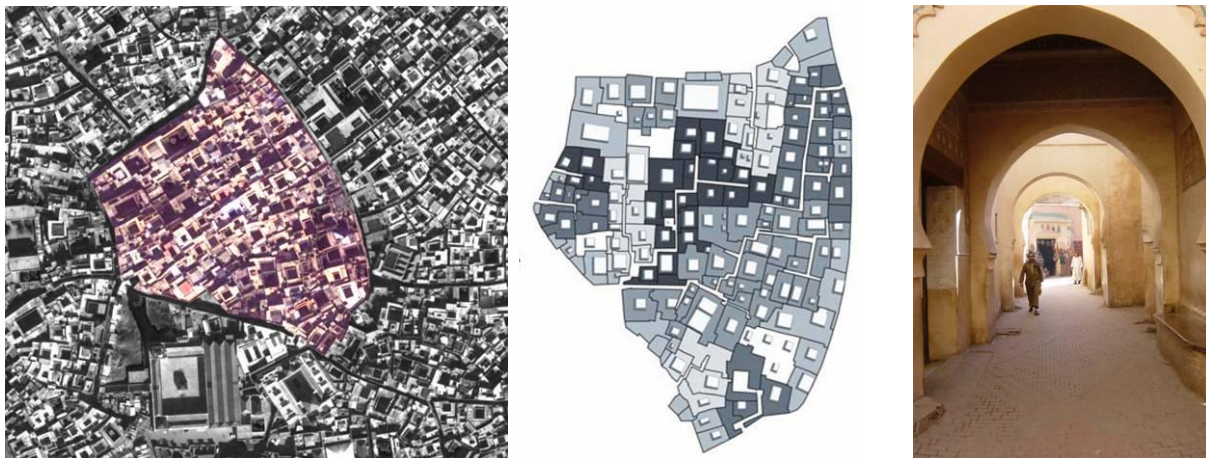


Figura 4.1 – Bairro de *Zaouiat Lakhdar*. À esquerda – fotografia aérea com o bairro da Medina de Marrakech demarcado a cores. Ao centro: planta isolada do bairro. À direita – rua coberta por construção – *derb*. Fonte: Imagens elaboradas no âmbito do projecto POCTI/AUR/42147/2001.

A cultura, a sociedade e lei Islâmica está intimamente ligada à religião (Islão). A Lei Islâmica (*Shari'ah*), o Corão (*Qur'an*), a Vida do Profeta (*Sunnah*) e outros códigos, como os de construção tradicional e as leis de herança e de doação são determinantes na configuração espacial urbana e arquitectónica. A sociedade islâmica é definida por uma forte relação social de conjunto subjacente ao conceito de irmandade, muito mencionado no Corão, o que leva com que a família, caracterizada por laços sociais duradouros, seja o elemento nuclear da sociedade muçulmana (Duarte et al., 2007: 320). Esta noção de célula base da sociedade leva a que o tipologia urbana essencial seja uma casa encerrada sobre si mesma, a Casa Pátio, formalizando, desta maneira, o princípio de privacidade e intimidade familiar da cultura muçulmana. As ruas, ao contrário do que ocorre por exemplo nas cidades ocidentais, são bastante estreitas e muitas vezes cobertas por construção, possuindo maior ou menor grau de privacidade à medida que providenciam acessos às casas.

A composição orgânica da Medina deriva da perspectiva muçulmana da sociedade, centrada na família. Os problemas familiares e entre famílias possuem um impacto directo na morfologia urbana podendo originar um enclausurar face à rua, à mudança da sua direcção, à destruição de uma casa, para a divisão do seu lote, ou outras decisões acerca da divisão de propriedade resultantes de disputas entre membros da mesma família sobre heranças. A expansão familiar poderá ocasionar o crescimento do piso superior da casa sobre o espaço urbano. Estes acrescentos, denominados *Sabbats*, cobrem parcialmente as ruas transformando-as em “corredores urbanos” que dão acessos às diferentes casas. Assim, o espaço urbano ramifica-se, progressivamente, para que o acesso às casas seja efectuado através de um corredor semipúblico denominado de *derb*. A cidade histórica Marroquina é organizada então numa progressão sucessiva do espaço público para espaços cada vez mais privados até se atingir a tipologia urbana predominante, a casa pátio. Após uma análise mais profunda sobre o tecido encontraram-se padrões urbanos repetidos segundo uma ordem pré-estabelecida. Estes padrões não são semelhantes sobre o ponto de vista geométrico mas sobre o topológico, pelo que alguns parâmetros (ângulos e dimensões) dos lotes e dos *derbs* podem variar. Foi a partir destes padrões que se conceberam esquemas paramétricos base para uma gramática de forma paramétrica urbana.

4.2.2 – Enquadramento Arquitectónico

A Casa Pátio da Medina de Marrakech é, geralmente, um edifício de dois pisos com fachadas exteriores, normalmente, cegas. A casa é constituída por salas estreitas e longas denominadas de *bayt*. As *bayts* são dispostas ao longo do pátio enclausurando-o, na maior parte dos casos, nos seus quatro lados (Figura 4.2).



Figura 4.2 – À esquerda: Pátio de *Dar Foundouk*. À direita: exterior hermético das Casas Pátio.

Fonte: Imagens elaboradas no âmbito do projecto POCTI/AUR/42147/2001.

Tal como a Casa Pátio é a célula básica do tecido urbano histórico da Medina de Marrakech, a *bayt* é a célula base da casa. Estas salas, além de possuírem grande flexibilidade geométrica, indispensável para adaptar a casa à sua vizinhança intrincada, contém uma grande flexibilidade funcional. Podem funcionar como quarto principal, como sala ou então ser uma unidade para uma nova família agregada à inicial. No que concerne à sua configuração geométrica, estas salas assumem, no perímetro exterior, as irregularidades da envolvente urbana mas possuem sempre paredes ortogonais ao longo do pátio, preservando a sua geometria regular (Duarte e Rocha, 2006: 862). Na Casa Pátio destacam-se mais dois compartimentos, a entrada e as escadas. A entrada é sempre localizada a um canto, enquanto as escadas podem situar-se nos cantos ou em compartimentos próximos. Observou-se que quando a casa possui dois compartimentos destinados a escadas, um dos compartimentos situa-se sempre perto da entrada da casa (Duarte e Rocha, 2006: 863).

O pátio, de forma quadrilátera em planta, é o espaço comum e aglutinador por excelência, onde todas as actividades sociais da família tomam lugar. As janelas do pátio garantem a ventilação e a iluminação das diferentes salas. Na maior parte dos casos as aberturas das fachadas do pátio providenciam acesso aos diferentes compartimentos. É por isso que as galerias possuem um papel relevante na estruturação da Casa Pátio. Além de criarem espaços de privacidade intermédia, entre as *bayts* e o pátio, providenciam a circulação horizontal e acesso aos diferentes espaços, funcionando também como elemento de sombreamento directo.

Devido às suas funções e à sua relevância morfológica na composição formal da casa, o pátio ganha uma dimensão de símbolo do papel social da família. Observou-se que há uma relação entre a dimensão dos pátios e a classe social da família. Geralmente as famílias mais abastadas possuem pátios maiores ou casas com mais do que um pátio, enquanto que as famílias mais modestas possuem casas com pátios menores.

4.2.3 Gramáticas de Forma

O trabalho precedente apostou no desenvolvimento de uma gramática de forma urbana e outra para a Casa Pátio. Foi observado que, para resolver os problemas entre a escala urbana e a escala doméstica, torna-se necessário desenvolver uma terceira gramática - de negociação - de modo a garantir a independência das outras. O propósito da gramática de negociação é mediar as outras duas regulando a permutação entre espaços adjacentes de cada lote de acordo com as necessidades dos seus proprietários (Duarte et al., 2007: 327-328).

Para efeitos de enquadramento do trabalho realizado anteriormente, ir-se-á apresentar a gramática urbana. Esta traça um cenário de enquadramento à gramática de forma da Casa Pátio. A gramática de forma desenvolvida para a Casa Pátio é importante na formulação deste caso de estudo visto que será a referência para a elaboração de algumas regras da parametrização. O caso de estudo não irá abordar a gramática de negociação focando-se somente no problema generativo da Casa Pátio.

4.2.3.1 Gramática de Forma Urbana

A gramática de forma urbana foi desenvolvida através de uma abordagem *Bottom-Up*, cuja ideia é a de crescimento dentro de um perímetro (Forma Limite) e não a de divisão e subdivisão do mesmo (abordagem *Top-Down*). As regras de forma aplicadas definem uma expansão incremental dos diferentes *derbs*, colocadas em diversos pontos de entrada no perímetro urbano, e na inserção sistemática de lotes. Os lotes que possuem acesso directo a partir das ruas são definidos numa fase inicial pela gramática. De seguida o crescimento dos *derbs* ocupa o espaço entre os lotes, possibilitando a inserção de mais lotes. Este processo é repetido até que todo o bairro esteja completo. Todavia, a iteração poderá gerar vazios locais ou tornar o acesso às casas muito complexo. Para resolver este inconveniente aplicaram-se valores, definidos pelo utilizador, a uma regra definida *a priori*, seguida de uma análise que testa se a inserção do *derb* ou do lote entra em conflito com elementos já gerados. Se não entrar em conflito o algoritmo continua o seu processo. Se, pelo contrário, entrar em conflito, a regra dada ao algoritmo é eliminada e ter-se-á de inserir novos valores, para a mesma regra, ou aplicar outras regras, de modo a testar outras alternativas, até o algoritmo poder continuar o seu processo generativo (Duarte et al., 2007: 328-329). Adoptou-se esta estratégia porque para implementar uma gramática de forma, do tipo *Bottom-Up*, que “corra” automaticamente é necessário desenvolver um sistema que seja capaz de determinar por si quais e como devem ser aplicadas as regras do processo generativo, em cada etapa da derivação, o que acarreta uma grande complexidade na implementação computacional.

A gramática de forma desenvolvida é aberta e não-determinística, pois podem ser aplicadas regras diferentes em cada passo da derivação, bem como atribuir valores diferentes aos parâmetros de cada regra, viabilizando a concepção de soluções diferentes para o mesmo perímetro. No âmbito do estudo da gramática de forma urbana realizou-se uma derivação do bairro existente de *Zaouiat*

Lakhdar. O resultado dessa derivação, as regras aplicadas e o intérprete utilizado, podem ser observados na Figura 4.3.

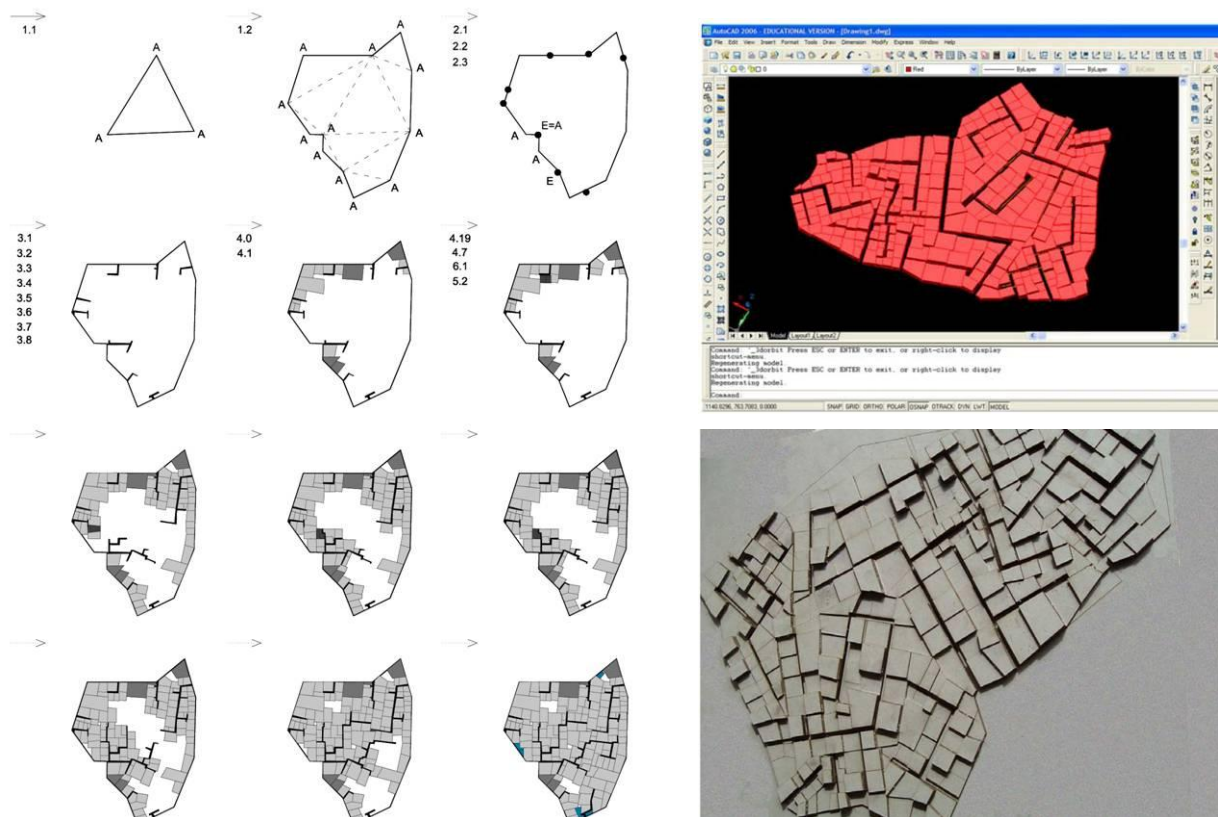


Figura 4.3 – Esquerda: Derivação Parcial do Bairro *Zaouiat Lakhdar*. Direita em cima: intérprete da Gramática de Forma Urbana. Direita em baixo: modelo físico de uma nova solução urbana, para o mesmo perímetro urbano de *Zaouiat Lakhdar*, gerada pelo intérprete e elaborada através de uma impressora de corte por laser. Fonte: Duarte et al., 2007: 338-340.

4.2.3.2 Gramática de Forma da Casa Pátio

Devido à dificuldade em aceder ao interior das habitações do bairro de *Zaouiat Lakhdar*, apenas foram levantadas e documentadas três das casas desse bairro. As restantes, que compõe o corpus estudado, situam-se em bairros vizinhos. Optou-se por levantar casas de bairros vizinhos porque, em levantamentos preliminares, observou-se que essas casas sugeriam uma estrutura formal semelhante às de *Zaouiat Lakhdar* (Duarte e Rocha, 2006: 861). Assim o *corpus*, a partir do qual se inferiram as regras, para a Gramática de Forma da Casa Pátio é constituída por oito casas (*Dar*): *Dar 27*, *Dar 33*, *Dar 73*, *Dar Dounia*, *Dar Frances*, *Dar Charifa* (Figura 4.4), *Dar Hannah*, e *Dar Fondouk*.



Figura 4.4 – Exemplo de uma Casa Pátio presente no *Corpus* estudado, *Dar Charifa*.

Através da análise das casas estabeleceu-se um modelo padrão formado por dois anéis rectangulares que rodeiam o pátio. O primeiro anel corresponde à *loggia* e o segundo às salas. Estes anéis podem rodear totalmente ou parcialmente o pátio, ou seja, podem construir todos os lados do pátio ou somente alguns (Duarte e Rocha, 2006: 863). O estudo do *corpus* identificou também a existência de um terceiro anel, destinado a salas adicionais. É neste terceiro anel que a gramática de negociação actua, pois é sobre ele que se efectuarão as cedências e as acomodações às construções vizinhas. O padrão básico composto por estes três anéis está patente na Figura 4.5.

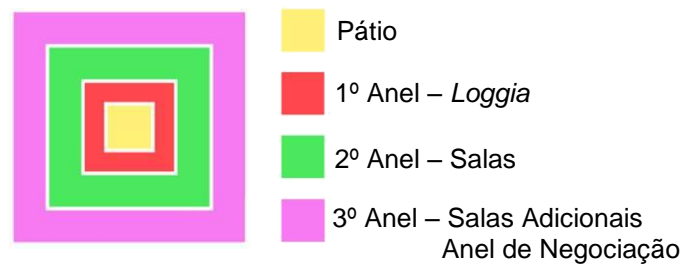


Figura 4.5 – Padrão de anéis definido para a Casa Pátio, na gramática de forma previamente desenvolvida. Fonte: Duarte e Rocha, 2006: 865

No âmbito do desenvolvimento desta gramática de forma realizou-se uma análise dimensional que permitiu estabelecer intervalos de variação das diferentes dimensões e proporções arquitectónicas, assegurando assim que os resultados da gramática fossem fiéis à morfologia arquitectónica existente. Observou-se que o rácio entre o comprimento e a largura do pátio é muito importante pois regula a forma do pátio. Os rácios existentes entre o comprimento do pátio e a profundidade dos dois anéis regulam a lógica existente entre o pátio e os diferentes anéis, não permitindo que o processo generativo conceba casas com pátios grandes e com galerias e salas muito estreitas e vice-versa.

A gramática de forma proposta para a Casa Pátio distribui as diferentes regras nas seguintes fases:

Fase 1, geração do Padrão básico (Duarte e Rocha, 2006: 864) – as regras desta fase possibilitam a geração de todos os padrões de casa possíveis. Salientam-se as regras que definem a forma inicial – perímetro da casa – e a inserção progressiva de aspectos gerais da casa como a geração do pátio, a inserção da *loggia*, a introdução do 2º anel, a diminuição do 2º anel, a inserção de partes do 3º anel. É nesta fase que possibilita a diferenciação entre o piso superior e o térreo,

nomeadamente nas galerias. No primeiro piso elas podem não existir mesmo que existam no piso térreo, contudo se existirem mimetizam a loggia do piso térreo.

Fase 2, inserção da Entrada (Duarte e Rocha, 2006: 864) – nesta fase a gramática específica a forma e a localização das entradas das casas. Verificou-se, no *corpus*, que, no intuito de preservar a privacidade da família, as entradas não permitem que o pátio ou outras partes da casa sejam observados a partir da porta de entrada. Assim sendo, as entradas ou são em “sifão” ou então a porta de entrada e o acesso à *loggia*, ou ao pátio, localizam-se em paredes perpendiculares. Mas a entrada tem de dar sempre acesso à *loggia* ou ao pátio.

Fase 3, inserção da Escada (Duarte e Rocha, 2006: 865) – poderá haver uma ou duas escadas. As escadas normalmente situam-se no 2º anel (o das salas), possuindo sempre acesso à *Loggia* quando esta existe. Quando existem duas escadas uma delas está localizada ao pé da entrada. A escada poderá ser localizada no pátio se a casa for demasiado pequena. A forma das escadas depende da altura dos pisos e da dimensão do compartimento pelo que a gramática poderá gerar escadas em “L”, em “U”, em “C” ou em “O”.

Fases Adicionais (Duarte e Rocha, 2006: 865) – a gramática possui mais 3 fases que completam o processo generativo. A Fase 4 divide as alas do 2º e do 3º anel em salas atribuindo-lhes ao mesmo tempo funções. Por seu lado a Fase 5 insere as aberturas para o pátio enquanto que a Fase 6 detalha de maneira mais particular as casas.

A gramática é capaz de gerar casas estudadas no *corpus* e novas soluções arquitectónicas, que cumprem as regras implícitas existentes no *corpus*. A gramática de forma para as Casas Pátio foi testada na derivação de algumas casas do *corpus*. A derivação e as regras aplicadas para *Dar Foundouk* podem ser observadas na Figura 4.6 enquanto que uma derivação resumida e os seus resultados comparados com as plantas das casas podem ser observadas no Anexo IV.

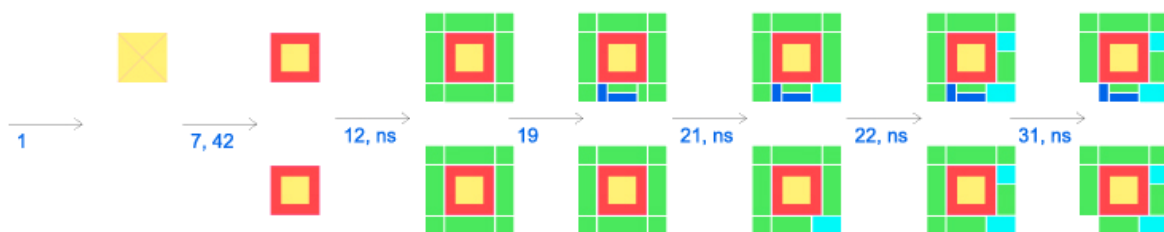


Figura 4.6 – Derivação de *Dar Foundouk* a partir da Gramática de Forma. Fonte: Duarte e Rocha, 2006: 865

4.3 Análise do Corpus

Devido à natureza diferente do processo generativo proposto nesta dissertação foi necessário realizar uma análise autónoma do Corpus. Esta análise pretende confirmar elações previamente efectuadas na formulação das regras da gramática de forma das Casas Pátio (Duarte e Rocha, 2006: 865), bem como efectuar um estudo e uma apresentação, mais detalhada, das relações arquitectónicas existentes. A análise permitirá identificar regras implícitas num corpus formalmente diversificado, fundamentais na elaboração das regras explícitas que irão condicionar o processo generativo, e na elaboração do Modelo Básico Inicial da Casa Pátio para o Gene_Arch.

4.3.1 Metodologia

Da análise efectuada ao corpus e das conclusões retiradas no estudo para a gramática de forma da Casa Pátio (Duarte e Rocha, 2006), foram tidos em conta diversos aspectos que irão orientar o estudo do *corpus*. Salientam-se os seguintes: a composição da casa em anéis que rodeiam o pátio, o padrão básico definido na gramática de forma, a posição da entrada e das escadas e a sua preponderância na volumetria e na compartimentação do 2º anel. Estes aspectos ditaram uma análise do *corpus* sistemática, subdividida em 3 análises distintas: a Análise Volumétrica, a Análise da Configuração Planimétrica e a Análise da Composição dos Alçados do Pátio.

A Análise Volumétrica consistiu num estudo cuidado aos anéis considerados na gramática de forma, da existência ou não existência de alas que rodeiam o pátio, da relação entre as diferentes alas, do comportamento da loggia e uma análise das dimensões gerais que definem a composição volumétrica. Neste estudo teve-se em consideração o padrão básico da casa pátio elaborado na gramática de forma.

A Análise da Configuração Planimétrica aborda duas matérias essenciais: a topológica e a compartimentação do 2º anel. Sob o ponto de vista topológico pretende identificar a localização e o posicionamento do compartimento da entrada e das escadas, as únicas funções realmente distintas na Casa Pátio. Como já foi mencionado, as *bayt* são multifuncionais, pelo que o posicionamento relativo das restantes funções não se reveste de particular importância. Este estudo pretende definir um modelo inicial a ser implementado no Gene_Arch, pelo que uma distribuição funcional pormenorizada não é essencial. Para além da análise topológica, realizou-se em paralelo um estudo que pretende encontrar padrões de compartimentação para o 2º anel.

Para a Análise da Composição dos Alçados do Pátio observou-se o esquema compositivo dos alçados de cada pátio com o intuito de encontrar padrões comuns na sua configuração. As dimensões de cada vão foram avaliadas bem como a sua posição relativamente ao pátio.

Todas as análises, aplicadas a cada casa, podem ser vistas em maior detalhe nos Quadros Analíticos e nas Tabelas presentes no Anexo V.

4.3.2 Análise Volumétrica

Nesta análise teve-se em conta o padrão básico proposto na gramática de forma para a Casa Pátio (Duarte e Rocha, 2006). Este padrão básico propõe a existência de 3 anéis rectangulares que rodeiam o pátio. O primeiro anel corresponde à *loggia*, o segundo às salas (*bayts*), às escadas e à entrada, o terceiro a salas e compartimentos adicionais. Apesar da maioria das casas possuírem compartimentos que se situam no 3º anel (apenas *Dar Foundouk* não possui este anel) verificamos que este anel nunca rodeia dois lados do pátio de modo contínuo, possuindo na maior parte dos casos um ou dois compartimentos. Depreende-se que este anel acomoda as casas às suas adjacências urbanas, encerrando um espaço de permuta determinado pelo contexto urbano onde cada casa se insere, pelo que não é essencial na constituição do núcleo básico da Casa Pátio. Assim

sendo, o estudo do corpus limitou-se aos primeiros dois anéis. Para isso realizou-se *a priori* uma identificação destes dois anéis considerados em cada casa.

Após ter-se enquadrado as casas nestes dois anéis dividiu-se o primeiro anel (o da *loggia*), em 4 galerias por piso e o segundo anel em 4 alas por piso. Foi atribuído um número a cada um dos lados do pátio. Como se pode observar na Figura 4.7 é através deste número que se irá identificar cada galeria e cada ala.

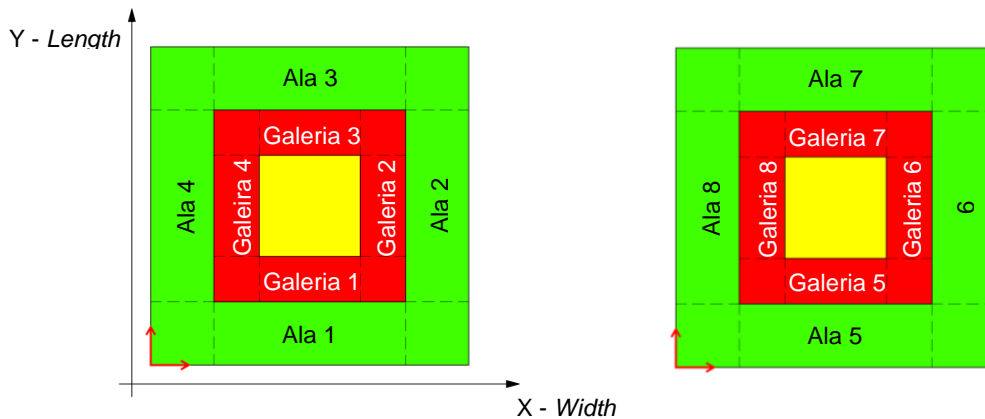


Figura 4.7 – Alas, Galerias e a origem do eixo coordenado (a vermelho) no Padrão Básico da Casa Pátio. À esquerda está representado o piso 0 e à direita está ilustrado o piso 1.

Tal como foi realizado na gramática de forma da Casa Pátio as dimensões do Pátio incluem o primeiro anel, pelo que a inserção da *loggia* irá retirar comprimento e/ou largura ao pátio inicialmente gerado. A Figura 4.7 também mostra o eixo coordenado da casa e como as medições foram efectuadas. Devido ao que foi previamente estipulado no padrão básico da gramática de forma, estabeleceu-se que as larguras, *Widths*, fossem medidas no eixo X, enquanto que os comprimentos, *Lengths*, fossem medidos no eixo Y. Assim por uma questão de simplificação, ir-se-á referir às diferentes dimensões pelo seu nome em Inglês, *Width* e *Length*. No que diz respeito às dimensões do pátio recorrer-se-á à sua forma abreviada *Wpatio* (*Width of the Patio*) e *Lpatio* (*Length of the Patio*), em conformidade com os termos utilizados na modelação.

No Corpus verificou-se que *Wpatio* varia entre 3.60m (*Dar 73*) e 10.71m (*Dar Dounia*). Por seu lado *Lpatio* varia entre 4,10m (*Dar 73*) e 9,03m (*Dar Charifa*). Como se pode constatar ao maior *Wpatio* nem sempre corresponde o maior *Lpatio*. Isto demonstra que não existe um rácio constante entre *Wpatio* e *Lpatio*. Por essa razão estudou-se o intervalo de valores entre o rácio que correlacionasse as duas dimensões do Pátio, $Rpatio = Lpatio / Wpatio$. Este valor permite deduzir o valor de *Wpatio* e de *Lpatio*, garantindo assim que uma proporção é cumprida para todos os pátios. Observou-se que *Rpatio* varia num intervalo cujo mínimo é 0,75 e o máximo 1,37. Os valores de *Wpatio*, *Lpatio* e de *Rpatio* podem ser observados na Tabela V.I presente no Anexo V.

No que concerne às galerias no piso 0, observou-se que, tendencialmente, quando existe uma ala no piso 1 e no piso 0, esta possui sempre uma galeria no piso térreo. Por exemplo, *Dar 73* possui três alas construídas no piso 0 e uma no piso 1 e só tem galeria onde existem salas no piso superior. Contudo, em *Dar 27*, apesar das suas 3 alas por piso, não existe nenhuma galeria e em *Dar*

Dounia e *Dar Frances*, com 3 alas por piso, existem somente 2 galerias em lados opostos. No piso 1 verifica-se que cada galeria é livre de existir de maneira independente.

Em relação à profundidade do 1º anel (*Dg – Deep of the Galleries*) verificou-se que as galerias possuem, normalmente, a mesma profundidade. Somente *Dar Dounia* apresentou valores diferentes de *Dg*. Os valores de *Dg* variam entre 1,00m (*Dar Frances*) e 1,90m (*Dar Charifa*) (ver Tabela V.II – Anexo V). É interessante notar que a menor profundidade da galeria não corresponde ao pátio mais pequeno e o maior pátio existente no corpus não implica que possua as galerias mais profundas. É claro que quanto maior for o pátio maior é a sua capacidade de ter uma galeria mais profunda mas a análise do *corpus* não demonstra uma correlação directa entre as dimensões do pátio e da galeria.

As larguras do 2º anel (*Wr – Width of the 2nd Ring*) mostram já uma maior diversidade de valores entre alas. Contudo, apenas *Dar Frances* e *Dar Hannah* apresentam uma diferença entre a ala mais larga e a menos larga superior a 0,50m. Os valores de *Wr* variam entre 2,10m e 4,07m. Notou-se uma tendência para os pátios maiores possuírem as alas mais largas, apesar de *Dar 27*, a casa com o pátio menor, possuir alas mais largas do que outras casas (ver Tabela V.II – Anexo V).

No que diz respeito às alas do 2º anel, observou-se que no piso térreo existem sempre 3 alas para conformar o pátio, como se pode verificar em *Dar 27*, *Dar 33* e em *Dar Dounia*. No piso 1, *Dar 73* demonstra-nos que pode só existir uma ala. Tal como tinha sido observado na análise efectuada para a gramática de forma da Casa Pátio, verificou-se que os lados das alas que conformam o pátio são sempre ortogonais. Contudo, uma análise mais atenta aos casos do corpus mostra-nos que a ortogonalidade está mais presente do que poderíamos supor. Dos 8 casos levantados apenas 3 (*Dar 27*, *Dar 33* e *Dar Hannah*) apresentam alas que assumem, em planta, uma forma trapezoidal mas mesmo neste casos o ângulo formado, pelas paredes, é muito próximo de 90°. *Dar 27* apenas tem uma ala que não é totalmente ortogonal, *Dar 33* apresenta três, das suas quatro alas, e por último *Dar Hannah* surge como o caso menos regular¹⁸. Conclui-se então que a adaptação à malha urbana, de geometria mais intrincada, é efectuada através de operações de adição e subtracção ao 3º anel do que propriamente de grandes variações de ângulos, impostos à periferia do 2º anel.

Como se pretende criar um Modelo Básico Inicial, para o problema generativo a implementar no Gene_Arch, é preciso ter em conta que este SGP efectua a simulação térmica e lumínica através do DOE, um programa de análise ambiental. Note-se que estes simuladores só modelam planos, sendo a espessura dos diferentes elementos incluída na sua composição construtiva. Por este motivo a altura dos pisos medem-se desde do pavimento até ao eixo das lajes. Tendo isto em conta realizou-se um registo das alturas de cada piso (ver Tabela V.X – Anexo V). Verificou-se que em três casos - *Dar33*, *Dar Charifa* e *Dar Hannah* - que as alas de cada piso não possuíam alturas iguais. Contudo, estes casos excepcionais foram contemplados no cálculo da média de altura para cada piso. O piso 0 possui uma altura média de 3,86m enquanto que o piso 1 tem em média 3,59m de altura. A média total da altura de pisos é de 3,73m.

¹⁸ *Dar Hannah* é o caso excepcional por excelência pois possui dois pátios. Se considerarmos o pátio principal verificamos a existência de duas alas de forma trapezoidal. Se considerarmos os dois pátio o número de alas mais irregulares aumenta. *Dar Hannah* também apresenta as maiores amplitudes de ângulos.

4.3.3 Análise da Configuração Planimétrica

Antes de iniciar o estudo da organização planimétrica é necessário referir que as salas dos cantos têm a possibilidade de pertencer a duas alas distintas. Dependendo do caso, determina-se a ala a que as salas pertencem como aquela onde a sala de canto possui a sua maior dimensão. Este princípio está devidamente ilustrado na Figura 4.8.

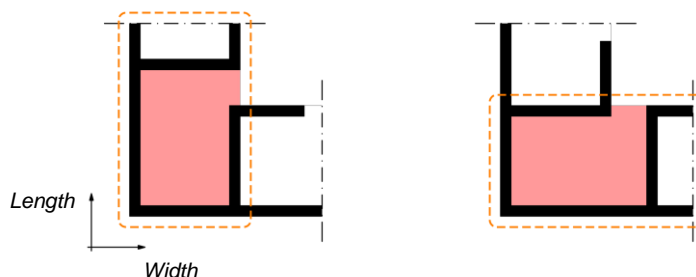


Figura 4.8 – Determinação da ala (demarcada a linha laranja tracejada) de uma sala de canto (marcada a cor). Se a sala de canto em questão se situasse no piso 0, no caso ilustrado à esquerda ela pertenceria à Ala 4 enquanto que no caso retratado à direita pertenceria à Ala 1.

Existem três tipos diferentes de sala: as *bayts* – de natureza multifuncional – a sala de entrada – que não pode possuir mais nenhuma função – e as caixas de escadas. Depreende-se, desde logo, que a entrada e as escadas são duas salas chave, pelo que se investigou a sua localização. Na maior parte dos casos a sala de entrada está localizada num dos cantos e mesmo nos casos onde tal não acontece (*Dar Dounia* e *Dar Foundouk*) a entrada é em “L”, conduzindo-nos sempre a um dos cantos do pátio. Tal como foi observado na gramática de forma da Casa Pátio, nenhuma entrada dá um acesso directo ao pátio, garantindo assim a sua privacidade e uma continuidade da lógica urbana cujos espaços canais se vão ramificando em graus de maior intimidade/privacidade.

As escadas são sempre interiores. A única excepção a esta regra é a escada de *Dar 73* que se situa no pátio, devido à dimensão reduzida desta casa. No máximo a Casa Pátio Marroquina possui duas escadas. Quatro casas do corpus (*Dar33*, *Dar Dounia*, *Dar Hannah*, *Dar Foundouk*) possuem duas escadas, enquanto que as restantes possuem somente uma. Observou-se uma tendência para as escadas localizarem-se nos cantos ou junto à entrada. Nas casas que possuem uma escada, esta situa-se sempre numa das alas que está em contacto com o compartimento da entrada, enquanto que nas casas que contém duas escadas observamos que uma delas está sempre na ala da entrada, ou numa que lhe é adjacente, e a que a outra escada pode posicionar-se em qualquer outra ala.

Observou-se que o espaço entre salas de canto, geralmente, ou é ocupado por uma única sala ou então é dividido em duas *bayts*. Existem poucos casos no Corpus onde o espaço entre cantos, do 2º anel, é dividido em mais compartimentos (ver Anexo V, Quadro Analítico V.II – *Dar 33*, onde a Ala 2, entre cantos, é dividida em 3 salas). No limite, cada ala poderá ser uma única sala.

As salas de canto, de cada piso, possuem uma tendência para serem bissimétricas, ou seja duplamente simétricas, entre si. Esta tendência não é evidente em todas as casas nem em todas as

salas do canto. Todavia, pode afirmar-se que existe um padrão implícito no corpus que nos indica que algumas regras de simetria e de bissimetria estão presentes na compartimentação do 2º anel. *Dar 33*, *Dar Charifa*, *Dar Frances* e *Dar Foundouk* revelam que se a simetria e/ou a bissimetria não está explicitamente patente pelo menos está-lo implicitamente, conforme a Figura 4.9 exemplifica. Estas regras de simetria relacionam-se com os alçados do pátio, simétricos individualmente e bissimétricos entre si, no contexto da casa.

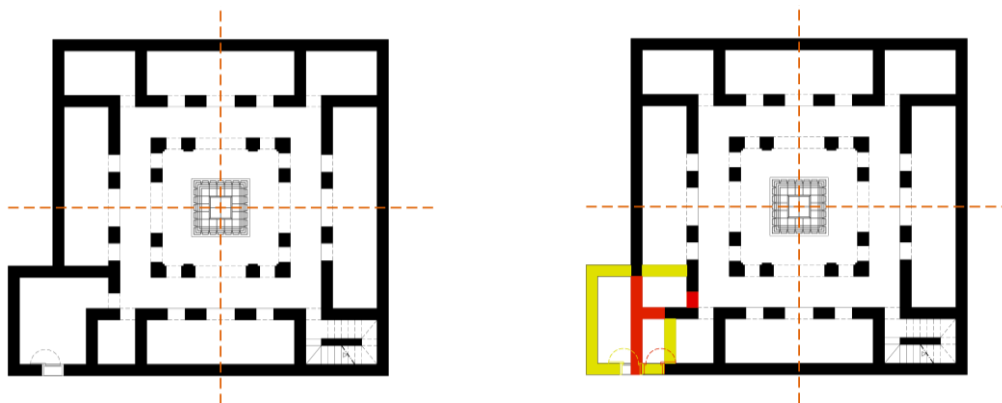


Figura 4.9 – Bissimetria implícita das salas de canto em *Dar Charifa*. À esquerda – planta do piso 0 e marcação dos eixos de bissimetria (linhas laranja tracejadas). À direita – Alterações a realizar (demolições a amarelo e construções a vermelho) para tornar o piso 0 de *Dar Charifa* totalmente bissimétrico.

No que diz respeito à relação entre a divisão do 2º anel nos dois pisos verifica-se uma tendência para que a compartimentação seja semelhante. Apenas três casas (*Dar Hannah*, *Dar Foundouk* e *Dar 33*) mostraram ter duas alas superiores com mais um compartimento do que as inferiores. *Dar Dounia*, *Dar Frances* e *Dar 27* possuem apenas uma ala superior com mais um compartimento do que a sua homóloga inferior. As restantes alas tendem a possuir o mesmo número de compartimentos. Contudo, temos de considerar a repetição da compartimentação nos dois pisos mais a um nível topológico do que propriamente geométrico. É importante ter em consideração que o *corpus* arquitectónico é de génese vernacular, onde as casas, frequentemente, são construídas sem projecto e aumentadas ao longo do tempo, de acordo com as necessidades, pelo que é natural as paredes divisórias dos dois pisos não coincidirem exactamente. Todavia, a ala superior de *Dar 73* mimetiza quase na perfeição a ala inferior (Figura 4.10).

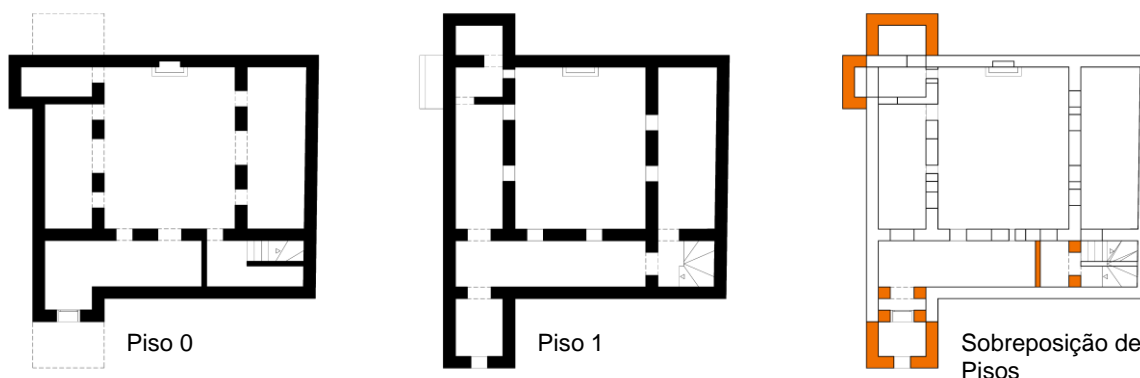


Figura 4.10 – Plantas de *Dar 27* e sobreposição de seus pisos. A laranja estão marcadas as paredes que não se sobrepõem.

4.3.4 Análise da Composição dos Alçados do Pátio

O estudo dos alçados interiores reveste-se de particular importância pois é um dos pontos essenciais que o Gene_Arch irá manipular. Só se consideraram estes alçados porque as Casas Pátio Marroquinas são quase cegas para o exterior. É através das aberturas do pátio que todos os compartimentos interiores recebem luz natural e ventilação. A fenestração dos paramentos desempenha um papel importante no comportamento térmico do edifício. O processo generativo, direccionado para a optimização energética, irá tentar encontrar, no intervalo de pesquisa definido, as fenestrações mais equilibradas, isto é aquelas que proporcionam uma boa iluminação natural, minimizando os gastos energéticos com a iluminação artificial, mas que não comprometem a questão térmica. A parametrização, desenvolvida neste tema, irá regular a manipulação que o Gene_Arch efectuará nos vãos de fachada para que as janelas estejam de acordo com as patentes no *corpus*.

Assim, os alçados do Pátio são também importantes na compartimentação interior. Como já tinha sido observado, os acessos aos compartimentos são efectuados a partir do pátio, ou das galerias em contacto com este. Das oito casas documentadas, a maioria possuem salas de acesso pelas janelas de sacada dos alçados do pátio. As casas onde se verificou a existência de mais do que uma sala acessível exclusivamente pelo interior foram: *Dar Dounia*, *Dar Frances* e *Dar Hannah*. *Dar Dounia* e *Dar Frances*. Possuem, respectivamente, duas salas acessíveis pelo interior. *Dar Hannah* é o caso excepcional, por excelência, pois no seu piso 1 todas as salas comunicam entre si pelo interior. Tal acontece porque a galeria de *Dar Hannah* é a única com cobertura em água (Figura 4.11).

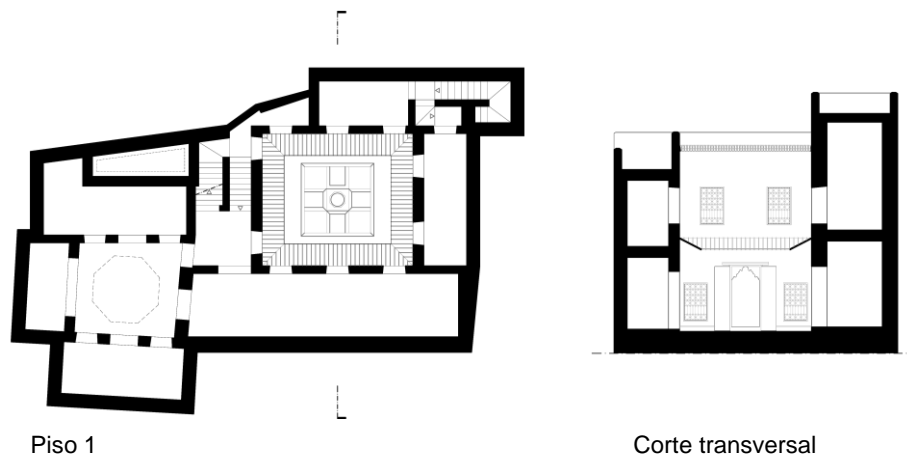


Figura 4.11 – Planta do piso 1 e corte transversal de Dar Hannah. Como se pode verificar a galeria do pátio é em água.

Cada piso do pátio possui, à partida, quatro alçados interiores, correspondentes a cada uma das alas. Estas fachadas foram numeradas obtendo o número da ala a que pertencem, como se pode observar na Figura 4.12.

Verificou-se que, em grande parte dos casos, cada alçado possui três janelas. Foram identificados 16 alçados que têm mais ou menos vãos, numa amostra de 54 alçados. Isto indica que em 70% dos casos os alçados possuem três janelas principais. Contudo, todos os vãos foram tidos em conta na análise dimensional que se efectuou aos alçados. Independentemente do número de

vãos o *corpus* indica-nos que cada alçado tende a ser simétrico. Os que não o são, rigorosamente, são-no topologicamente ou então implicitamente (Figura 4.13).

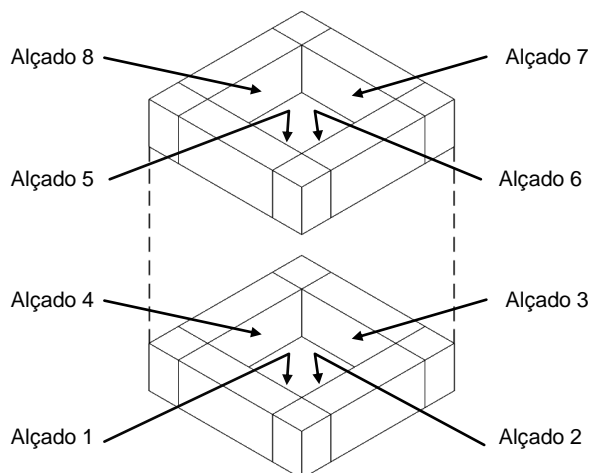


Figura 4.12 – Axonometria explodida do 2º anel da Casa Pátio Marroquina com a nomenclatura dos diferentes alçados do pátio. Em baixo os alçados das alas do piso 0 e em cima das alas do piso 1.

O eixo de simetria localiza-se a meio do alçado pelo que, cada fachada do pátio, possui um vão central e dois vãos laterais iguais. Os vãos laterais geralmente assumem duas posições, determinadas pelo facto de pertencerem, ou não, a uma sala de canto. Quando um dos vãos laterais pertence a uma sala de canto - 1ª Posição - posiciona-se, geralmente, junto ao alçado perpendicular (Figura 4.14), quando não pertencem - 2ª Posição - localizam-se na primeira quarta parte do alçado (Figura 4.14). No caso da 2ª posição foi estudada a relação da posição do eixo do vão em relação às dimensões do Pátio (Tabela V.VIII – Anexo V) e concluiu-se que, em média, os eixos dos vãos laterais situam-se a 0,19 de W_{patio} ou de L_{patio} .

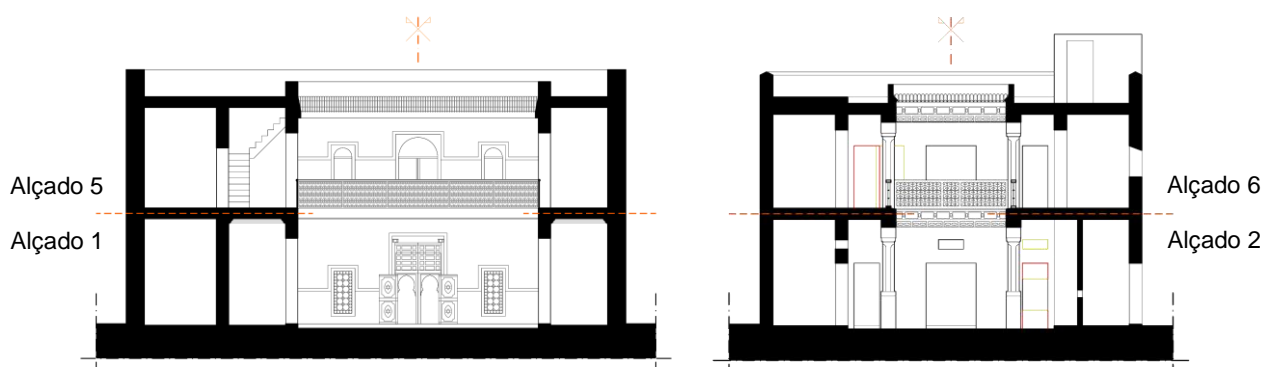


Figura 4.13 – Simetria dos Alçados. Esquerda: alçados simétricos de *Dar Frances*. Direita: Simetria implícita dos alçados de *Dar Foundouk* devido sobretudo à existência de vãos centrais. As linhas amarelas representam as demolições e as vermelhas o que seria necessário refazer para tornar os alçados perfeitamente simétricos.

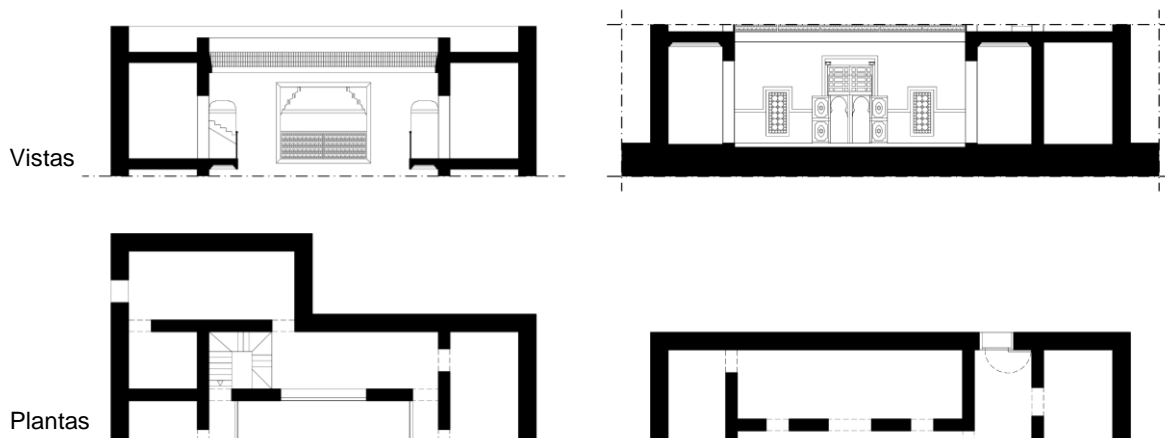


Figura 4.14 – Posicionamento dos vãos laterais. À esquerda encontramos a 1ª posição, patente no Alçado 8 (piso1) de Dar Frances. À direita a 2ª posição para os vãos laterais, exemplificada no Alçado 1 (piso 0) de Dar Frances.

Os alçados do pátio possuem a tendência a serem bissimétricos entre si, ou seja, os alçados de alas paralelas normalmente são idênticos. Dois eixos, perpendiculares entre si, regulam este padrão de simetria. Muitos alçados do *corpus* demonstram que esta bissimetria chega a ter uma grande exactidão geométrica como se pode observar pelo exemplo patente na Figura 4.15.

Nos casos onde esta bissimetria não é explícita pode-se inferi-la pois geralmente é quebrada ou por um pequeno desalinhamento de um vão ou pela inexistência de uma janela (Figura 4.15).

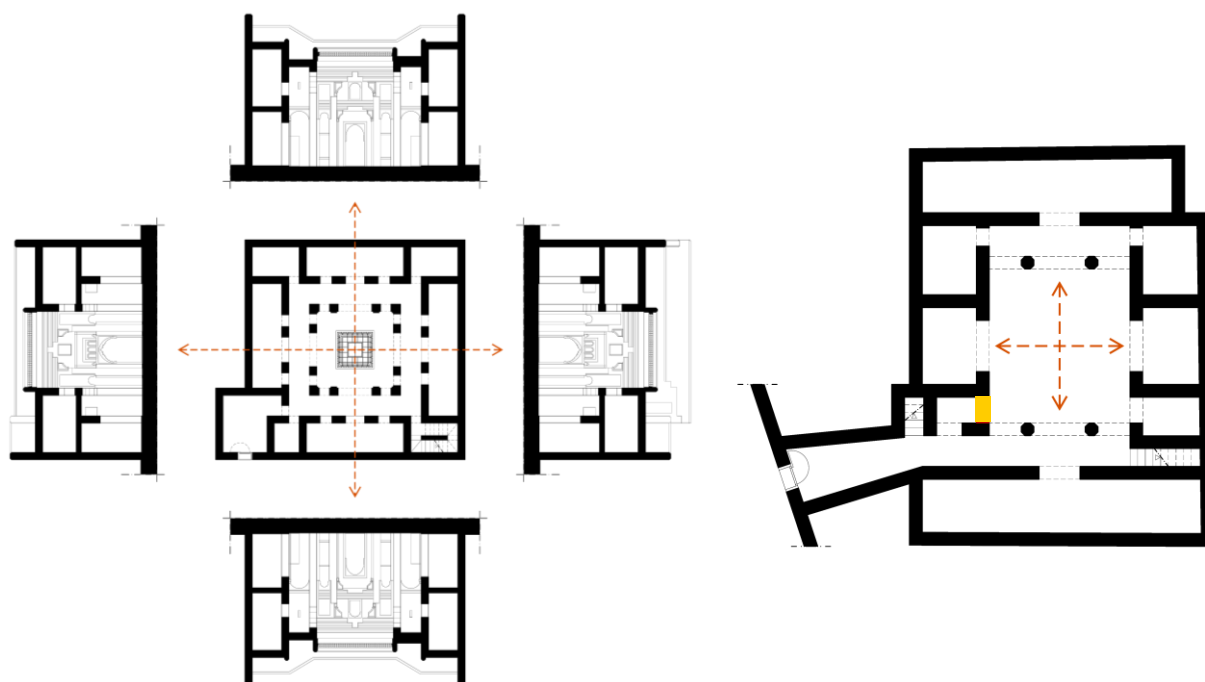


Figura 4.15 – Bissimetria, explícita e implícita, entre alçados. Esquerda: *Dar Charifa* onde todos alçados são perfeitamente simétricos entre si. As setas, a laranja, representam a correspondência da simetria entre os alçados. Direita – Planta do piso 0 de *Dar 33*. Nela podemos observar a bissimetria implícita entre os Alçados 2 e 4. Falta um vão (a amarelo) para os Alçados 2 e 4 serem perfeitamente simétricos entre si.

No que diz respeito à forma dos vãos observou-se que os vãos centrais nunca são menores do que os laterais. Na maior parte dos casos são maiores mas, no limite, os vãos centrais possuem as mesmas dimensões do que as dos vãos laterais.

A largura dos vãos (W_{win}) laterais do piso 0 varia entre 0,50m e 1,19m enquanto que a dos vãos centrais varia entre 1,00m e os 3,00m. No piso 1 a largura dos vãos laterais varia entre 0,70m e 1,90m enquanto que a das janelas centrais se situa no intervalo entre 0,70m e 3,00m (Tabela V.III e Tabela V.IV - Anexo V).

No que concerne à altura dos vãos, realizaram-se duas medições: uma contabiliza a distância desde o pavimento do piso até à verga, que se denominou de altura do vão (H_{win}), e a outra mede a diferença que existe entre a cota de soleira do piso e a do parapeito (Y_{win}). Esta dupla análise foi necessária em virtude das janelas laterais dos alçados poderem ou não, ser de sacada.

No piso 0, as fenestrações laterais variam entre 1,75m e 2,43m enquanto que a altura do vão central situa-se no intervalo com um mínimo de 2,00m e máximo de 3,48m. No piso 1 a altura das janelas laterais insere-se no intervalo que vai desde de 1,15m até 2,50m. Por seu lado a altura dos vãos centrais do piso 1 variam entre 0,90m e 2,78m¹⁹ (Tabela V.V e Tabela V.VI – Anexo V).

Nas janelas laterais verificamos que a dimensão entre o pavimento e o parapeito varia num intervalo entre 0,00m (caso em que, mesmo não sendo necessário, a janela pode ser de sacada) e 0,80m (Tabela V.VII – Anexo V).

Foi então possível padronizar 3 alçados tipos, devidamente ilustrados na Figura 4.16.

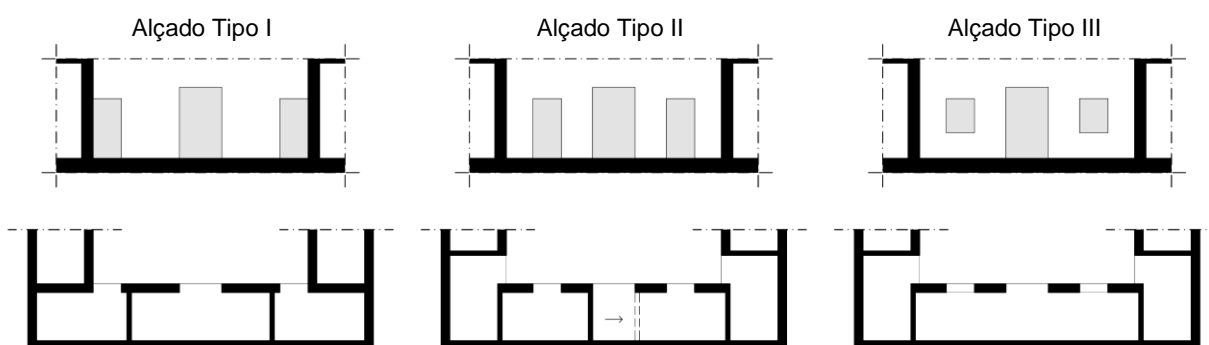


Figura 4.16 – Alçados Tipo e esquemas em planta correspondentes. Da esquerda para a direita: Alçado Tipo I, Alçado Tipo II e Alçado Tipo III.

O Alçado Tipo I sucede quando uma das salas de canto possui abertura para o pátio. Como já foi referido, as janelas laterais da sala de canto tendem a ficar juntas à fachada do pátio que lhe é perpendicular. Devido ao princípio de simetria verificado no *corpus*, a outra janela lateral tende para ser simétrica, mesmo que não pertença a uma sala de canto.

O Alçado Tipo II ocorre quando o alçado não possui salas de canto, só com uma abertura, ou quando o alçado não tem janelas para salas de canto e possui mais do que uma sala. Uma das salas terá somente uma abertura, pelo que este vão terá de ser de sacada de maneira a assegurar o

¹⁹ O mínimo de 0,90m corresponde a uma janela do piso 1 de *Dar Charifa*, cuja galeria não providencia acesso às salas do piso 1.

acesso directo ao pátio. Como os alçados são simétricos e como uma das salas possui uma janela lateral de sacada, a outra, obrigatoriamente, terá de possuir um vão lateral igual.

O Alçado Tipo III é uma variante do Alçado Tipo II. Este alçado só se verifica quando, entre salas de canto, a ala é ocupada só por uma sala. Como o vão central é sempre de sacada, o acesso à sala está garantido pelo que os vãos laterais podem não tocar no pavimento.

4.4 Elaboração do Problema Generativo

4.4.1 Processo Generativo Proposto

Como já foi referido, o SGP para o qual será desenvolvido um processo generativo é o Gene_Arch. Este SGP recorre a AG como processos de optimização evolutivos e a um simulador térmico e lumínico, o DOE 2.1, que avalia a performance das soluções concebidas pelo AG. Para que o DOE 2.1 realize a sua simulação térmica e lumínica tem de modelar o objecto arquitectónico em estudo em três dimensões, e definir toda a sua materialidade.

O processo generativo que este estudo propõe é o de manipular, a partir de valores gerados pelo AG, os parâmetros variáveis impostos a um Modelo Básico Inicial, da Casa Pátio Marroquina. Para modelar um padrão básico é necessário construir uma estrutura elementar fixa, descrita em código, que contenha em si todas as possibilidades de transformação permitidas pelas regras do processo generativo.

Num caso típico de simulação térmica e lumínica o utilizador especifica o espaço em estudo, bem como outros aspectos relacionados com a envolvente do edifício, disposições construtivas e sistemas mecânicos de ventilação e acondicionamento do ar. O resultado da simulação será um conjunto de dados, térmicos, lumínicos e de consumo energético, referente à solução arquitectónica que foi modelada no DOE 2.1.

Após a simulação o AG continua o seu processo generativo, direccionando-o para efeitos de optimização, ao conceber uma nova geração de indivíduos tendo em conta os valores de performance obtidos na geração anterior. Este processo de optimização é repetido quando o número de gerações definido pelo utilizador for esgotado²⁰.

4.4.2 Metodologia

O processo generativo a implementar no Gene_Arch foi realizado em três etapas:

1) Definição do Modelo Básico Inicial – é necessário estabelecer um modelo de Casa Pátio Marroquina inicial que irá ser parametrizado. Este modelo inicial será um padrão a partir do qual todas as possibilidades terão de ser derivadas. Assim sendo, o código terá de prever todos os elementos arquitectónicos passíveis de ocorrer no processo generativo.

²⁰ Para ver o funcionamento do Gene_Arch ver capítulo 3, secção 3.3 - Gene_Arch, da presente dissertação.

2) Regras e Restrições ao processo Generativo – é a partir das regras que condicionamos o processo generativo para conceber soluções pertencentes a um mesmo *corpus* estilístico. As observações retiradas da análise do *corpus* são determinantes na elaboração destas regras. À semelhança do que foi efectuado na análise, as regras foram agrupadas em 3 tipos: 1) Regras Volumétricas; 2) Regras de Composição de Alçados; 3) Regras de Compartimentação.

3) Parâmetros variáveis do Modelo Básico Inicial – a partir do modelo inicial podemos identificar quais são os parâmetros variáveis que irão permitir a geração de casas diferentes. Para especificar os parâmetros temos de considerar que o DOE 2.1 constrói o modelo a partir do particular para o geral. É através da definição de cada sala e da sua incrementação sucessiva que obtemos a casa pátio. Por isso foi necessário distinguir dois tipos de variáveis: 1) Variáveis Gerais – que parametrizam aspectos gerais e essenciais à composição volumétrica e dos alçados e à compartimentação; 2) Variáveis Particulares – que codificam especificamente as diferentes salas. O comportamento de todas as variáveis é determinado pela aplicação das regras impostas ao processo generativo.

4.4.3 Modelo Básico Inicial

Concebeu-se um modelo arquitectónico inicial que possibilitasse todas as derivações possíveis, permitidas pelas regras que irão controlar o processo generativo. O código resultante representará a estrutura essencial da tipologia da Casa Pátio Marroquina e a sua parametrização possibilitará a concepção e a avaliação da performance energética das diferentes soluções arquitectónicas, concebidas pelo SGP.

As observações resultantes da análise do *corpus* foram fundamentais para estabelecer um padrão arquitectónico tipo. Devido à diversidade de soluções arquitectónicas apresentadas no *corpus* estudado, foi necessário realizar uma síntese de forma a elaborar um modelo tipo da Casa Pátio Marroquina. A natureza da arquitectura, de génese vernacular e orgânica, dificulta a elaboração de um único modelo que contenha em si todas as particularidades verificadas no *corpus*. Isto obrigou a efectuar uma simplificação do modelo arquitectónico, onde nem todas as ocorrências observadas foram contempladas. A simplificação do modelo incidiu sobretudo no número de pisos possíveis, na altura dos pisos, no número de salas possíveis, no número de vãos de janela em cada alçado e na imposição da simetria em todos os alçados do pátio. A Figura 4.17 ilustra o Modelo Básico Inicial.

Tal como tinha sido observado na análise do *corpus*, apenas *Dar 33* possui três pisos, todas as outras casas possuem dois pisos. Optou-se claramente por padronizar a Casa Pátio Marroquina como uma casa de 2 pisos. Apesar de o piso superior ser mais baixo do que o piso térreo, observou-se no *corpus* casos onde acontecia o contrário, pelo que se optou por calcular uma média geral das alturas dos pisos atribuindo-a como altura fixa para cada um dos pisos. Esta opção também garante que as alturas das janelas no piso 1 não sejam limitadas *a priori*. Assim sendo os dois pisos possuem uma mesma altura que corresponde à média de alturas observadas no *corpus*: 3,73m.

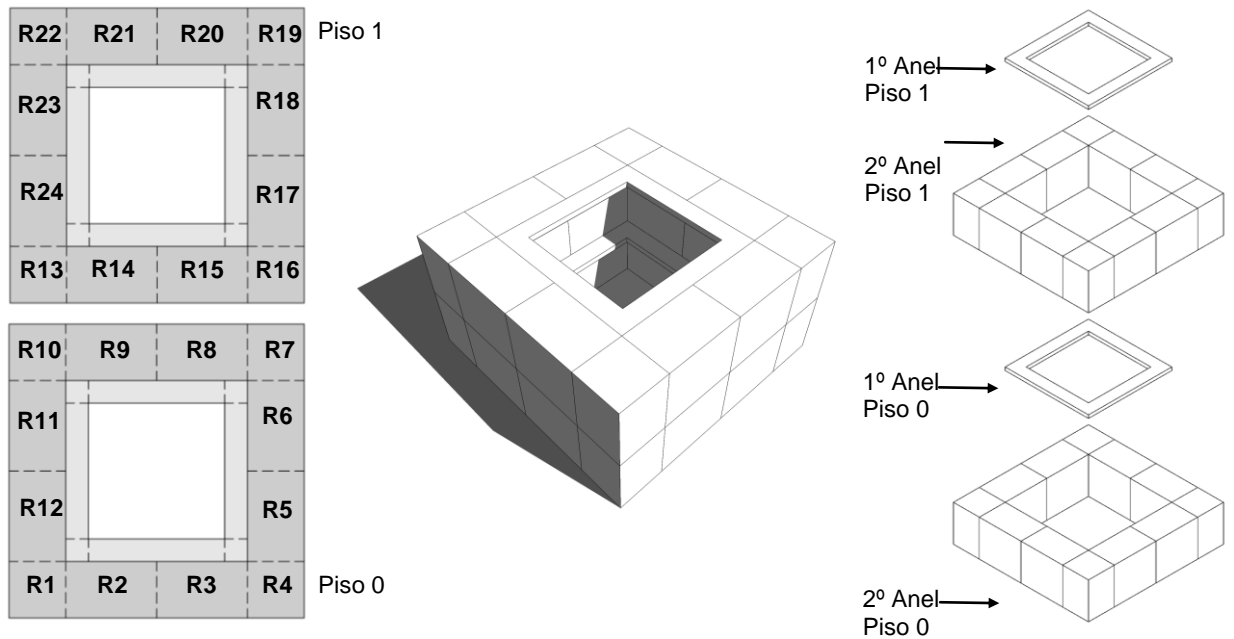


Figura 4.17 – Modelo Básico Inicial. À esquerda planta de cada piso com a nomenclatura das salas (*R* abrevia *ROOM*), no centro perspectiva, e à direita axonometria explodida.

Cada piso possui no máximo quatro galerias, que irão compor a *loggia*, e quatro alas, que por seu lado irão compor o 2º anel. Tal como se concluiu na Análise da Composição dos Alçados do Pátio, cada alçado possui em média três janelas dispostas simetricamente no alçado, pelo que cada ala terá sempre três vãos orientados para o pátio. A partir dos três modelos de Alçado Tipo foi possível parametrizar dois tipos de alçado. A Figura 4.18 mostra os dois tipos de Alçados Paramétricos (de variação extrema) do modelo inicial, derivados a partir dos três Alçados Tipo padronizados na análise do *corpus*.

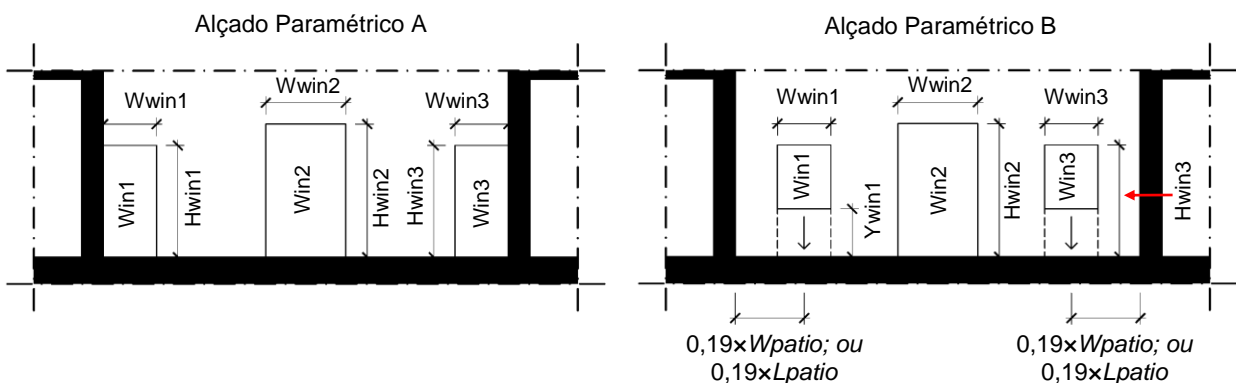


Figura 4.18 – Alçados Paramétricos - Esquerda: Alçado Paramétrico A – aplicado quando o Alçado possui as duas salas de canto. Direita: Alçado Paramétrico B – aplicado quando o Alçado não possui salas de canto. Todas as cotagens indicam dimensões variáveis.

O Alçado Paramétrico A é aplicado quando o alçado possui as duas salas de canto. Como foi constatado as salas de canto possuem normalmente janelas encostadas à parede do pátio que lhes é perpendicular. Devido a razões que se prendem com a complexidade de programação as salas de

canto não podem possuir mais do que uma janela, limitando deste modo o seu comprimento mas facilitando o cálculo das dimensões das salas intermédias. As janelas laterais serão o seu único acesso ao pátio, por isso serão sempre de sacada. Este alçado gera alçados do Tipo I.

O Alçado Paramétrico B ocorre quando o alçado não possui as duas salas de canto em simultâneo. O espaço intermédio pode ser então ocupado por duas salas no máximo. O posicionamento dos vãos foi deduzido através da análise do *corpus*. A análise efectuada indica-nos, que em média, os eixos dos vãos laterais distam $0.19 \times L_{patio}$ ou W_{patio} , dependendo do alçado em estudo, do limite do alçado. O Alçado Paramétrico B pode gerar Alçados do Tipo II – quando existem duas salas os vãos terão de ser de sacada para garantir acesso à sala que possui apenas uma janela – e Alçados do Tipo III – onde existe só uma sala pelo que o vão central assegura o seu acesso.

Foi observado no *corpus* que, apesar de algumas alas apresentarem um número superior de salas, a maior parte possuía, tendencialmente, duas de canto. Contudo, como também se confirmou na análise realizada, o acesso pelas salas faz-se, na maioria dos casos, pelo pátio ou galeria adjacente, pelo que, para garantir que o SGP não gerasse soluções com muitos compartimentos minúsculos, na tentativa de diminuir o consumo energético necessário para os iluminar e os aquecer, limitou-se o número de salas, entre cantos, a duas salas. Assim, neste modelo potencial, o número de salas máximo previsto por piso é de 12 salas, o que perfaz um total de 24 distribuídas pelos dois pisos. Contudo, este número não corresponde ao número máximo de salas possível numa solução gerada pelo SGP devido à apropriação que estas terão de fazer das janelas do alçado tipo. Em certas alas não é possível gerar duas salas intermédias porque o acesso pelo pátio a todas as salas não pode ser garantido.

4.4.4 Regras

As regras irão impor restrições ao comportamento das variáveis de modo a garantir que o SGP encontre soluções que pertençam ao *corpus* estilístico da Casa Pátio Marroquina. A análise efectuada anteriormente (Duarte et al. 2007) foi essencial, pois permitiu identificar certos padrões e tendências de modo explicitar regras que estavam subjacentes ao *corpus*. Algumas das regras concebidas simplificam as transformações aplicáveis ao Modelo Básico Inicial reduzindo a complexidade da programação do processo generativo. As regras são agrupadas em três grupos, que se relacionam directamente com as três fases da análise do *corpus*: Regras do Comportamento Volumétrico; Regras de Composição dos Alçados do Pátio e Regras de Configuração Planimétrica.

4.4.4.1 Regras do Comportamento Volumétrico

Estas regras regulam o comportamento dos aspectos mais gerais da casa como as dimensões gerais da casa, as alas e as galerias dos dois pisos. As Regras volumétricas são:

Regra 1 – No piso 0 são necessárias 3 alas, no mínimo, para conformar o pátio.

Este foi o número mínimo de alas, observado no *corpus*, necessário para conformar o pátio no piso 0. No piso 1 verificou-se que as alas já podiam existir independentemente, desde que exista no

mínimo uma que garanta a existência do piso 1. Isto leva a que todas as salas de canto existam no piso 0 como se pode observar na Figura 4.19.

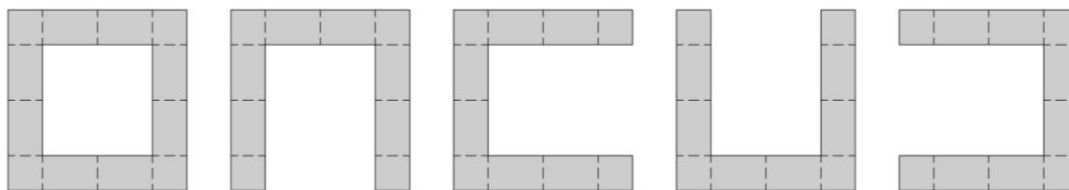


Figura 4.19 – Possibilidades de configuração das alas do piso 0 determinadas pela Regra 1.

Regra 2 – No piso 1 a ala onde se localiza o compartimento das escadas terá que obrigatoriamente existir.

Esta regra é uma consequência lógica da obrigatoriedade de existência do piso 1, proposta pelo Modelo Básico Inicial. As escadas articulam sempre cotas diferentes daí terem sempre de se localizar numa ala que possua dois pisos.

Regra 3 – Uma ala do piso 1 só pode existir se a ala correspondente do piso 0 existir.

Não se verificou em nenhuma das casas estudadas a existência de alas do piso superior que não tivessem a sua homóloga no piso inferior. A Casa Pátio Marroquina possui uma sobreposição vertical da estrutura, tirando partido do bom comportamento, à compressão, do adobe, sistema construtivo mais utilizado na região e que estas casas possuem. Assim sendo, é natural que não existam volumes suspensos, em consola ou simplesmente apoiados, sendo as paredes periféricas geralmente muito espessas e de natureza resistente.

Regra 4 – Se uma ala do piso 1 existir, a galeria correspondente do piso 0 terá de existir.

Tal como foi observado, na análise do corpus, a maioria dos compartimentos possui acesso através do pátio ou da galeria (ver Regra 14). Para garantir que o mesmo esquema de acesso se mantenha nas alas do piso superior é necessário existir uma galeria nas alas congêneres do piso 0.

Regra 5 – A dimensão mínima para o Pátio (incluindo as galerias) é igual a 3,00m.

Apesar de ter sido encontrado um rácio que regula a proporção entre comprimento e largura do pátio foi necessário estabelecer esta regra que limita qualquer medida do pátio que possa ser gerada abaixo da menor dimensão encontrada no corpus (*Dar 73*): 3,00m.

Regra 6 – A dimensão mínima para o vazio do Pátio (dimensão do pátio descontando as galerias) é de 1,00m.

Esta regra é aplicada para garantir que existe um vazio correspondente ao pátio, já que a profundidade das galerias irá subtrair comprimento e/ou largura a esse espaço. Não se restringiu mais a dimensão mínima do vazio porque a própria otimização, aplicada pelo SGP, irá eventualmente eliminar soluções onde o vazio é muito pequeno, devido ao seu mau desempenho lumínico.

4.4.4.2 Regras da Composição dos Alçados do Pátio

Os alçados dos pátios possuem de longe a composição arquitectónica mais rígida e marcante das Casas Pátio Marroquinas, pelo que estas restrições são essenciais para a preservação das características arquitectónicas do objecto em estudo. Tendo em conta os Alçados Paramétricos estabelecidos no Modelo Básico Inicial, estabeleceram-se as seguintes regras:

Regra 7 – Os alçados são sempre simétricos, com eixo de simetria no vão central.

Isto implica que a largura dos vãos laterais (W_{win1} e W_{win3}), a sua altura (H_{win1} e H_{win3}) e a distância do pavimento ao peitoril (Y_{win1} e Y_{win2}) sejam iguais: $W_{win1} = W_{win3}$; $H_{win1} = H_{win3}$; $Y_{win1} = Y_{win3}$.

Regra 8 – O comprimento vão central (W_{win2}) nunca é inferior ao comprimento dos vãos laterais (W_{win1} e W_{win3}): $W_{win2} \geq W_{win1}$.

Na maior parte dos casos estudados a janela de sacada central é o maior vão, em comprimento e em altura. Alguns casos apresentam os três vãos de dimensões iguais. Foi necessário estabelecer esta regra porque o comprimento de cada vão irá variar independentemente.

Regra 9 – A altura do vão central (H_{win2}) nunca é inferior à altura dos vãos laterais (H_{win1} e H_{win3}): $H_{win2} \geq H_{win1}$.

As razões apresentadas na regra anterior são igualmente aplicáveis para a altura do vão central, pois como já foi indicado, o vão central possui o comprimento e a altura igual ou maior que as duas congéneres laterais.

Regra 10 – Os alçados das alas são bissimétricos entre si.

A maioria dos casos do *corpus* demonstra uma tendência para que os seus alçados sejam bissimétricos entre si, pelo que os alçados de alas paralelas serão idênticos.

Regra 11 – Os eixos de cada vão são iguais nos 2 pisos.

A análise do *corpus* mostra-nos que, geralmente, os vãos do piso 1 estão centrados com os vãos do piso 0. Esta regra permite estabelecer uma reciprocidade de compartimentação entre os dois pisos, sendo uma das razões que justificam a aplicação da Regra 18.

4.4.4.3 Regras de Configuração Planimétrica

Os princípios definidos neste ponto permitem particularizar e detalhar a Casa Pátio, durante o processo generativo, produzindo *feedback* no comportamento volumétrico e na composição de Alçados. O propósito, destas regras, é gerir e orientar a compartimentação das diferentes alas que compõem o 2º anel. A simplificação do Modelo Básico Inicial e a adopção de certos padrões e tendências, deduzidas aquando da análise do *corpus*, foram fundamentais na sua concepção. As regras adoptadas para a compartimentação do 2 anel foram:

Regra 12 – A sala de Entrada localiza-se sempre no canto inferior esquerdo, ou seja na ROOM 1.

Esta regra fixa o comportamento topológico do Modelo Básico Inicial pois estabelece quais as alas onde a caixa de escadas poderá existir e conseqüentemente quais as alas que terão de existir obrigatoriamente no piso 1. A mudança de orientação da casa é conferida pela variação do seu azimute e não da realocação da sala de Entrada.

Regra 13 – As escadas só podem existir nas salas da primeira e quarta ala.

O *corpus* indica-nos que podem existir duas escadas em simultâneo. Também se observou que, geralmente, existe sempre uma escada numa das alas que está em contacto com a entrada. Por uma questão de simplificação topológica e de programação, limitou-se o número de escadas a um. Assim sendo, a escada apenas pode existir nas salas da Ala 1 e da Ala 4. Reforçou-se a probabilidade das escadas se posicionarem num dos cantos dessas alas de modo a expressar a tendência de quando existe apenas uma escada, esta se posiciona com maior frequência a um canto (Figura 4.20).

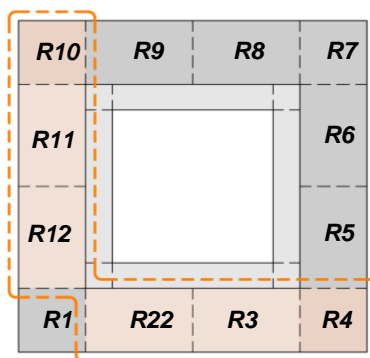


Figura 4.20 – Localizações possíveis para as escadas (destacadas a cor de laranja) no piso 0 do Modelo Inicial Básico.

Regra 14 – Todas as salas são acedidas pelo pátio ou pela galeria.

Verificou-se que a maioria das salas do 2º anel eram acedidas pelo Pátio, directamente ou através de uma galeria que lhe é adjacente. Apesar de existirem casos pontuais onde o acesso é interior (por exemplo *Dar Hannah*), optou-se por aplicar este princípio e remeter essa particularidade para alguns casos excepcionais. Ao contrário do que possa parecer a adopção desta restrição confere uma maior flexibilidade funcional às *bayts*. Ao garantir uma maior privacidade permite que, no limite, uma sala seja destinada para uso de uma pequena família (sempre agregada à família da casa) caso que não é incomum na sociedade Marroquina.

Regra 15 – As salas dos cantos são sempre Bissimétricas.

A análise realizada mostrou um padrão subjacente de bissimetria entre as salas dos cantos. Este padrão relaciona-se em grande parte com a bissimetria dos alçados. Assim, como a *ROOM 1* é a primeira sala a ser descrita no DOE2.1E, e como também é a entrada da casa, será a sua orientação e configuração que ditará a forma das outras salas, assumindo deste modo um papel chave na parametrização (Figura 4.21).

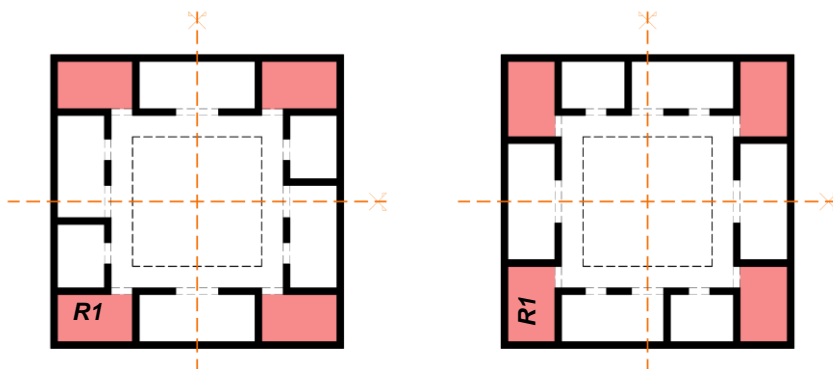


Figura 4.21 – Bissimetria das salas de canto (marcadas a cor) imposta pela Regra 15. A orientação da *Room1 (R1)* determina a configuração das restantes salas de canto.

Regra 16 – Salas de canto alinham sempre pelo limite do primeiro vão da ala onde se localizam (Figura 4.22).

Esta regra foi aplicada para limitar o número de possibilidades a adoptar pelo processo generativo (bem como a intrincada rede de relações que existem entre elas). A aplicação desta regra garante um esquema topológico onde as salas intermédias possam sempre ocorrer nas soluções geradas pelo SGP. A sala de canto alinhará pelo limite do primeiro vão lateral, da fachada da ala onde se encontra, tendo em conta a espessura da parede divisória.

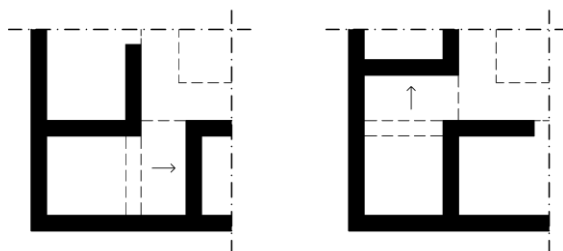


Figura 4.22 – Configuração das salas de canto determinada pelo primeiro vão da ala onde a sala se localiza. A seta determina a evolução da posição original do Modelo Básico Inicial para a posição final.

Regra 17 – O limite das salas intermédias (entre cantos) é determinado pelos limites dos vãos.

A estrutura compositiva do alçado é de hierarquia superior à da compartimentação interior pois é ela que restringe a configuração das salas e não o contrário. Esta regra reflecte a importância simbólica do pátio na arquitectura doméstica da Medina de Marrakech. Esta regra garante que nenhuma parede divisória surja a meio do vão.

Regra 18 – O esquema de compartimentação do piso 0 é repetido no piso 1.

No *corpus* verificou-se que existe uma tendência para que a compartimentação seja semelhante nos dois pisos. O facto dos eixos dos vãos dos dois pisos estarem alinhados (Regra 11) é determinante na elaboração desta regra pois como as janelas são os elementos arquitectónicos que regulam a compartimentação é lógico que a compartimentação dos dois pisos seja análoga. Tal como foi observado na análise do *corpus*, a reprodução de compartimentação é mais de natureza topológica do que morfológica pois como é permitido aos vãos do piso 1 possuírem dimensões diferentes das

janelas do piso 0, as paredes interiores das salas nos dois pisos podem não estar perfeitamente alinhadas. Esta regra também foi adoptada como medida de simplificação do Modelo Básico Inicial pois permite que conheçamos, *a priori*, as adjacências entre as salas dos dois pisos. O desconhecimento prévio das adjacências dificultaria a programação, devido ao aumento considerável de possibilidades generativas a contemplar provocado pelo maior número de elementos arquitectónicos, como tectos e paredes parciais, que teriam de ser considerados no Modelo Básico Inicial e na codificação do comportamento das variáveis.

4.4.4.4 Excepções

A conjugação das regras entre si e o grau de liberdade conferido a alguns parâmetros variáveis leva a que certos casos, passíveis de serem gerados pelo SGP, não possam cumprir todas as regras estipuladas. Estes casos, denominados de excepcionais, foram tidos em conta na elaboração do processo generativo para se poderem definir o comportamento das excepções às regras definidas. De todas as excepções tidas em conta salientam-se duas:

1º Caso excepcional: A Figura 4.23 ilustra este caso excepcional, que ocorre quando duas salas de canto, no piso 0, não podem assumir a configuração da *ROOM1* porque a ala onde deveriam estar posicionadas não existe. A Regra 15, que estabelece que as salas de canto sejam bissimétricas entre si deixa de ser cumprida. As salas de canto excepcionais vão alinhar pela primeira janela do alçado perpendicular ao da ala onde o *ROOM 1* se situa, de modo a cumprir a Regra 16. Considerando o que foi estipulado no Modelo Básico Inicial, o alçado onde se localiza a sala excepcional de canto é um Alçado Paramétrico do Tipo B. Este tipo de alçado paramétrico pode conceber fachadas do Tipo III, onde as janelas laterais não são de sacada. Todavia, como possui a sala de canto e como a Regra 14 determina que as salas têm de ser acedidas pelo pátio e como a Regra 7 impõe a simetria nos alçados, as janelas laterais terão forçosamente de ser de sacada. Tal como a Figura 4.23 exemplifica, o Alçado Paramétrico B é restringido a gerar somente Alçados do Tipo II nas alas que possuem salas de canto excepcionais.

2º Caso excepcional: A Regra 2 determina que, no mínimo, uma ala terá sempre de existir no piso 1. Esta ala também terá de estar sobre uma ala no piso 0, conforme estipulado na Regra 3. Como a Regra 18 determina que a compartimentação do piso 1 é análoga à do piso 0 pode dar-se o caso em que as salas de canto do piso 1, poderão não ser capazes de mimetizar a disposição das suas congéneres do piso 0, porque a ala onde se deveriam prolongar não existe. Isto implica também a inexistência de uma janela lateral que lhes dê acesso a partir das galerias. Para esta excepção permitiu-se ao SGP gerar salas cujo acesso não se processe através da galeria adjacente ao pátio no piso 1, pelo que o seu acesso seria interior, tal como está exemplificado na Figura 4.24. Optou-se por adoptar esta abordagem porque: 1) tinha-se verificado no *corpus* que, em casos excepcionais, os acessos às salas poderiam ser exclusivamente interiores (*Dar Hannah*); 2) se este caso excepcional ocorrer, as salas de canto no piso 0 serão sempre residuais e de menor dimensão, funcionando quase

como anexos; 3) devido a uma questão de simplificação de programação. Este é o único caso onde se permite que as salas não sejam acedidas a partir do pátio e/ou da sua galeria.

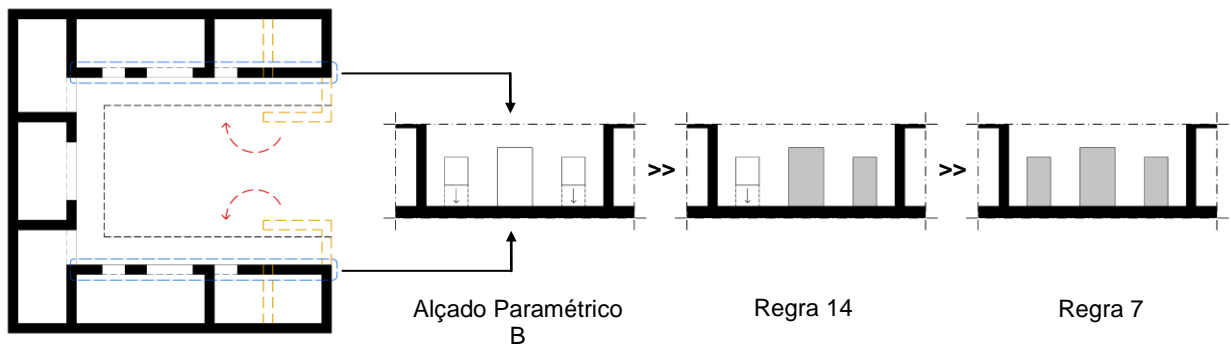


Figura 4.23 – 1º Caso Excepcional. Devido à inexistência da Ala 2 as salas *ROOM 4* e *ROOM 7* não podem assumir a configuração da *ROOM 1* deixando por isso de cumprir o princípio de bissetria entre salas de canto. O novo posicionamento da *ROOM 4* e da *ROOM 7* obrigam a que os Alçados Paramétricos do Tipo B possuam janelas de sacada.

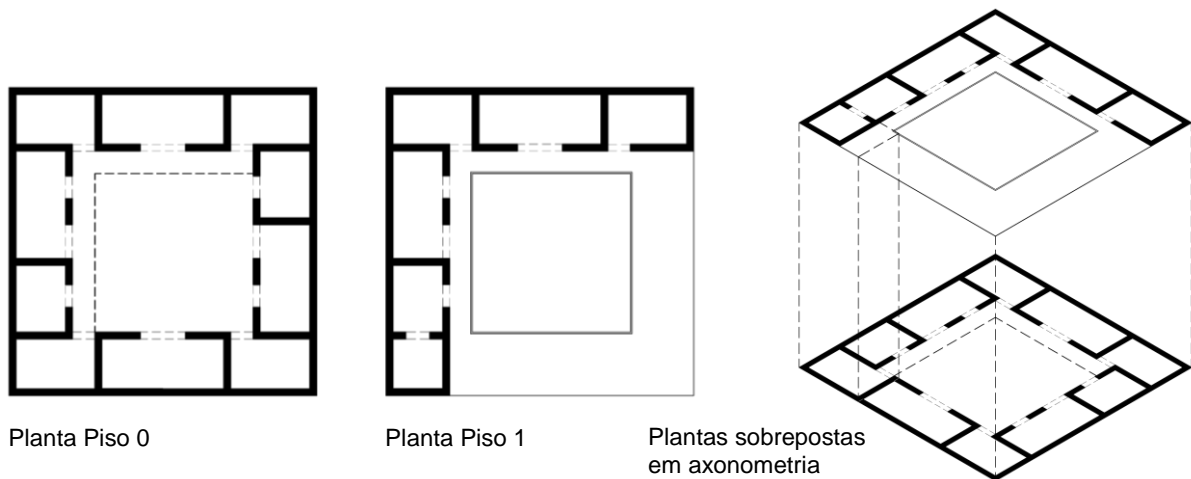


Figura 4.24 – 2º Caso Excepcional – exemplo onde é permitido que uma sala de canto do piso 1 seja acedida pelo interior.

4.4.5 Parâmetros variáveis do Modelo Básico Inicial

Ao definir o Modelo Básico Inicial e as regras podemos identificar quais são e como se comportam os parâmetros, requeridos pelo DOE 2.1 quando aplicada à modelação das Casas Pátio. Como a modelação dos edifícios faz-se através da incrementação da descrição individual das salas, parametrizou-se o modelo inicial a dois níveis: um geral e outro particular.

Os parâmetros variáveis gerais referem-se aos elementos gerais da casa pátio que teremos de determinar para se poder prever o comportamento do processo generativo e inferir as variáveis

particulares, que correspondem àquelas que permitem modelar cada sala e que, muitas das vezes, são dependentes dos valores das variáveis gerais e das possibilidades de transformação do Modelo Básico Inicial.

A análise do *corpus* e a determinação das Regras foram fundamentais para estipular o intervalo de cada variável. As relações possíveis de estabelecer entre as diferentes variáveis são, de algum modo, limitadas pelo AG aplicado. O AG ainda não permite aplicar restrições dinâmicas às variáveis geradas de forma independente (Caldas, 2002a). Isto significa que a geração de uma variável não pode basear a variação do seu intervalo no valor de outra variável. Tendo isto em consideração permitiu-se que as variáveis passíveis de serem geradas directamente pelo AG o fossem existindo *a posteriori*, em alguns casos, etapas de confirmação dos seus valores de algumas variáveis, assegurando assim o cumprimento das regras e do Modelo Básico Inicial proposto.

4.4.5.1 Parâmetros Variáveis Gerais

Este grupo de variáveis permite estabelecer um conjunto de dimensões, possibilidades e variações formais na Casa Pátio. Podem ser separadas em dois grupos:

Parâmetros Variáveis Volumétricos – a Figura 4.25 mostra os Parâmetros Variáveis de natureza volumétrica.

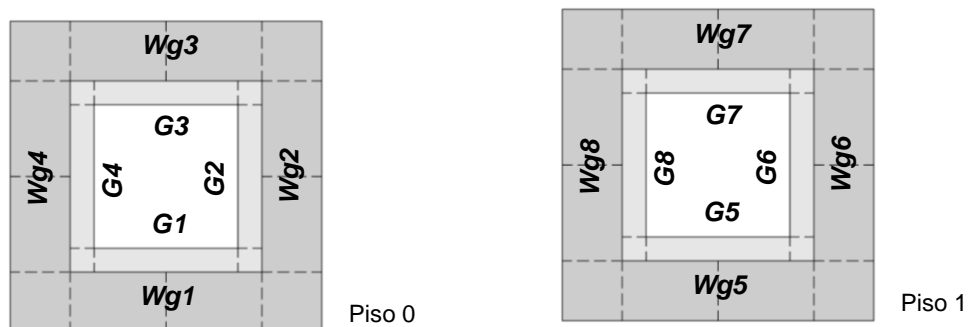


Figura 4.25 – Plantas do Modelo Básico inicial com respectivas variáveis volumétricas.

Estas variáveis determinam a existência de cada uma das Alas (*Wg1* a *Wg8*) e cada uma das galerias (*G1* a *G8*), que compõem a *Loggia* que envolve o pátio. A possibilidade de existência para cada uma destas variáveis não pode ser considerada isoladamente, sob pena de se perder a coerência observada no *corpus*. Para garantir a observância da Regra 1, que determina o número mínimo de alas para conformar o pátio no piso 0, os valores das variáveis *Wg1* a *Wg4* tiveram de ser confirmados *a posteriori*. O seguinte trecho em pseudo-código, e as figuras que o ilustram, exemplificam como uma dessas etapas de confirmação foi codificada para a Ala 2 (*Wg2*):

Wg2:

IF {(Wg1= \emptyset **AND** Wg2= \emptyset **AND** Wg3 \neq \emptyset)} **THEN**

Wg2final \neq \emptyset (Figura 4.26)

ELSE IF {(Wg1 \neq \emptyset **AND** Wg4 \neq \emptyset **AND** Wg2= \emptyset **AND** Wg3= \emptyset)} **THEN**

(**IF** Wg2-3= \emptyset **THEN**

Wg2final= \emptyset

ELSE

Wg2final \neq \emptyset

END)} (Figura 4.27)

END IF

A Figura 4.26 exemplifica o primeiro bloco de ocorrências para se poder formar o “U” mínimo que conforma o pátio no piso 0 onde a Ala 2 tem de existir (Wg2 \neq \emptyset) mesmo que o AG defina, *a priori*, que ela não existe (Wg2= \emptyset).

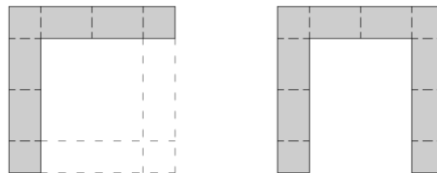


Figura 4.26 – 1º Bloco de ocorrências que define a obrigatoriedade da existência da Ala 2 para formar o U mínimo requerido para conformar o pátio no piso 0.

Por seu lado a Figura 4.27 ilustra o segundo bloco de ocorrências. Aqui as Alas 1 e 2 existem mas o AG determinou que as outras duas Alas não existem. Isto não garante o nº mínimo de alas definido na Regra 1, pelo que o SGP terá forçosamente de gerar a Ala 2 ou a Ala 3. Para se poder regular qual das alas deverá existir foi criada uma variável independente auxiliar (Wg2-3) cujo valor só irá ser utilizado neste conjunto de condições para determinar qual das alas, Ala 2 ou 3, terá de existir.

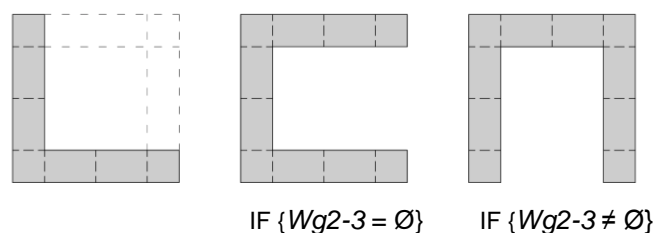


Figura 4.27 – 2º Bloco de ocorrências. A obrigatoriedade da existência da Ala 2 depende do valor gerado pelo AG para a variável auxiliar Wg2-3.

Os parâmetros volumétricos que determinam a existência das alas superiores (Wg5, Wg8) também foram sujeitos a um procedimento semelhante que compara o valor gerado para cada uma das alas do piso1 pelo AG com a existência da ala congénere do piso 0, de modo a determinar se cada uma das alas do piso 1 pode existir ou não, para cumprir a Regra 3. Também as galerias que

compõem a *Loggia* do piso 0 tiveram de passar por um processo de confirmação de modo a assegurar o cumprimento da Regra 4 conjugada com a Regra 14.

Parâmetros Variáveis Dimensionais – na Figura 4.28 estão indicadas as dimensões variáveis necessárias para determinar o modelo básico inicial. As variáveis gerais dimensionais são:

Wpatio – *Width of the Patio* – cujo valor é gerado independentemente. A análise volumétrica balizou o seu intervalo de variação entre 3,60m e 10,71m.

Lpatio – *Length of the Patio* – para garantir a proporção do pátio, encontrada na análise do *corpus*, este parâmetro é proporcional a *Wpatio* tendo em conta o valor gerado para o rácio do Pátio (*Rpatio*). Assim: $Lpatio = Rpatio \times Wpatio$. Tal como *Wpatio*, *Rpatio* é um valor gerado independentemente pelo AG. Nas observações realizadas no *corpus* verificou-se que este rácio variava num intervalo entre 0,75 e 1,37. Teve-se de se restringir este intervalo, pois o valor mínimo do *Rpatio* (0,75) multiplicado pelo valor mínimo de *Wpatio* (3,60m), originava um *Lpatio* de 2,70m, não cumprindo a dimensão mínima de 3,00m estipulada para o pátio na Regra 5. Para que esta regra fosse cumprida restringiu-se o valor mínimo do intervalo de *Rpatio* para 0,84.

Dg – Profundidade da Galeria (*Deep of the Gallery*) – tal como foi definido na gramática de forma elaborada para a Casa Pátio (Duarte e Rocha, 2006), a profundidade da *Loggia* será subtraída ao pátio. Os valores observados no *corpus* para *Dg* limitavam esta variável no intervalo entre 1,00m e 1,90m. Como este intervalo de variação é lato pode-se dar o caso do pátio ser demasiado pequeno para inserir as galerias. A Regra 6 estabelece uma dimensão mínima para o vazio do pátio de 1,00m. Se o comprimento ou a largura do vazio do Pátio for inferior a 1,00m, após a inserção das galerias, é aplicada uma restrição ao valor gerado para *Dg* para que se possa cumprir a Regra 6. O trecho de *pseudo código* abaixo descreve como se realizou a confirmação do valor desta variável. A seta representa o passo de confirmação, isto é a passagem de um valor prévio para o final.

***Dg* → *Dg_final*:**

MinPatio = min(*Lpatio*, *Wpatio*)

IF {((MinPatio - (2 × *Dg*)) < 1.00m)} THEN

***Dg_final* = (MinPatio / 2) – 0.50m**

ELSE

Dg_final* = *Dg

END IF

Onde MinPatio é uma variável auxiliar que determina qual a menor dimensão do Pátio.

Wr – Largura do 2º Anel (*Width of the 2nd Ring*) – a análise do *corpus* arquitectónico definiu o seu intervalo de variação entre 2,10m e 4,07m. Logicamente quanto maior for o pátio maior a sua capacidade de possuir um 2º anel mais largo pelo que se poderia codificar o intervalo desta variável dependente dos valores gerados para *Wpatio* ou *Lpatio*. Porém, como o AG, utilizado pelo

Gene_Arch, ainda não permite que variáveis independentes variem em intervalos determinados por outras variáveis (Caldas, 2002a), optou-se por deixar que *Wr* variasse no intervalo determinado pelo *corpus*, sabendo de antemão que se está a permitir ao SGP gerar alas muito profundas. Todavia, isto não constitui um problema, pois o processo de optimização, inerente ao SGP, deverá considerar esses casos menos aptos pelo dispêndio energético em iluminação por m².

Wwin1 – Largura (*Width*) das Janelas (*Windows*) Laterais – esta variável determina o comprimento das duas janelas laterais para os Alçados 1 e 4, do piso 0, e para os Alçados 5 e 8, do piso 1, separadamente. O SGP irá gerar valores individuais desta variável para cada um destes alçados. Os valores encontrados para cada um destes alçados serão aplicados nos restantes de modo a cumprir o princípio de bissetria entre alçados estipulado na Regra 10.

No *corpus* esta dimensão varia entre 0,50m e 1,90m. Como, em alguns casos, estes vãos terão de garantir o acesso às salas considerou-se o valor de 0,50m muito pequeno aumentando-se por isso para 0,70m (valor muito comum no *corpus* para esta dimensão). Após ter definido o intervalo de variação é necessário verificar os valores produzidos pelo AG, de modo a garantir que as janelas geradas não excedam, em comprimento, as fachadas do pátio. Se tal acontecer o valor gerado para *Wwin1* é restringido para que os vãos possam caber na dimensão do alçado em questão. É essencial conhecer de antemão a espessura das paredes e o tipo de alçado para efectuar a confirmação do valor gerado inicialmente. Esta etapa de confirmação do valor gerado pelo AG para cada *Wwin1* é exemplificada no seguinte trecho de *pseudo-código*, que define o valor final para *Wwin1* do primeiro alçado (*Wwin1-1*).

***Wwin1-1* → *Wwin1-1_final*:**

```
IF { (ELEVATION_TYPE= Alçado Paramétrico A) AND
      (((2 × Wwin1-1) + Wwin2-1_aux21 + (2 × 0.4m)) > Wpatio) } OR
  { (ELEVATION_TYPE= Alçado Paramétrico B) AND
      ((2 × 0.19 × Wpatio) + Wwin1-1) + Wwin2-1_aux + (2 × 0.4m) > Wpatio }
THEN
  Wwin1-1_final= 0.70m
ELSE
  Wwin1-1_final= Wwin1-1
END IF}
```

Hwin1 – Altura (*Height*) das Janelas (*Windows*) Laterais – este parâmetro variável mede a distância do pavimento à verga dos vãos laterais do Alçado. Optou-se por aplicar este método porque esta janela pode ser de sacada. Os valores observados na análise enquadram esta dimensão no intervalo que vai desde 1,75m a 3,48m. Como estes vãos terão de, eventualmente, garantir o acesso a um compartimento redefiniu-se o intervalo deste parâmetro de 2,00m a 3,48m.

²¹ Ver parâmetro variável *Wwin2*.

Ywin1 – Distância do pavimento até ao peitoril – o valor desta variável é aplicado caso os vãos laterais não necessitem ser de sacada. Isto só acontece quando o alçado em questão for um Alçado Paramétrico do Tipo B só com uma sala. Esta variável varia independentemente entre 0,00m e 0,80m.

Wwin2 – Largura (*Width*) da Janela (*Window*) Central – parâmetro de comportamento independente que varia no intervalo entre 1,00m e 3,00m. O valor inicial terá de ser verificado para que possa cumprir duas premissas essenciais: 1) A Regra 8 determina que a condição, $Wwin2 \geq Wwin1$, seja sempre observada; 2) A soma dos comprimentos dos três vãos de cada alçado não pode ultrapassar o comprimento do alçado. Foi necessário realizar dois passos de confirmação para o valor inicial de $Wwin2$ que são aqui exemplificados através de $Wwin2-1$ (vão central do Alçado 1):

1º Passo de confirmação do valor de $Wwin2-1$ – o seguinte trecho de pseudo-código demonstra como se restringiu o valor inicial de $Wwin2-1$ para que a Regra 8 fosse cumprida.

Wwin2-1 → Wwin2-1_Aux:

MinPatio= max(Wwin1-1, Wwin2-1)

2º Passo de confirmação do valor de $Wwin2-1$ – este passo garante que o valor final atribuído a $Wwin2$, somado com o comprimento dos dois vãos laterais, não exceda o comprimento da fachada. Se exceder o comprimento do alçado em questão o valor final de $Wwin2$ será o maior possível tendo em conta a dimensão de $Wwin1$ e do pátio. O seguinte pseudo-código exemplifica como este passo de confirmação foi efectuado:

Wwin2-1_Aux → Wwin2-1_Final:

IF { ELEVATION_TYPE= Alçado Paramétrico A } THEN

{IF (((2xWwin1-1) + Wwin2-1_Aux + (2x0.4m)) ≥ Wpatio) THEN

Wwin2-1_final= Wpatio - ((2xWwin1-1) + (2x0.4m))

ELSE

Wwin2-1_final= Wwin2-1_Aux

END IF }

ELSE IF { ELEVATION_TYPE= Alçado Paramétrico B } THEN

{IF (((2x0.19xWpatio) + Wwin1-1 + Wwin2-1_Aux + (2x0.4m)) ≥ Wpatio)

THEN

Wwin2-1_final= Wpatio - ((2x0.19xWpatio) + Wwin1-1 + (2x0.4m))

ELSE

Wwin2-1= Wwin2-1_Aux

END IF }

END IF

Hwin2 - Altura (*Height*) das Janelas (*Windows*) Laterais – no *corpus*, esta dimensão varia entre 2,00m e 3,48m. Como a Regra 9 determina que a altura do vão central nunca pode ser inferior à altura dos vãos laterais - $Hwin2 \geq Hwin1$ – foi necessário verificar o valor gerado pelo AG nesta variável. Assim aplicou-se uma abordagem semelhante à utilizada no primeiro passo de confirmação

de W_{win2-1} , determinando que quando o valor inicial, gerado pelo AG, para H_{win2} for inferior ao valor de H_{win1} , o valor de H_{win2} igualará o valor de H_{win1} .

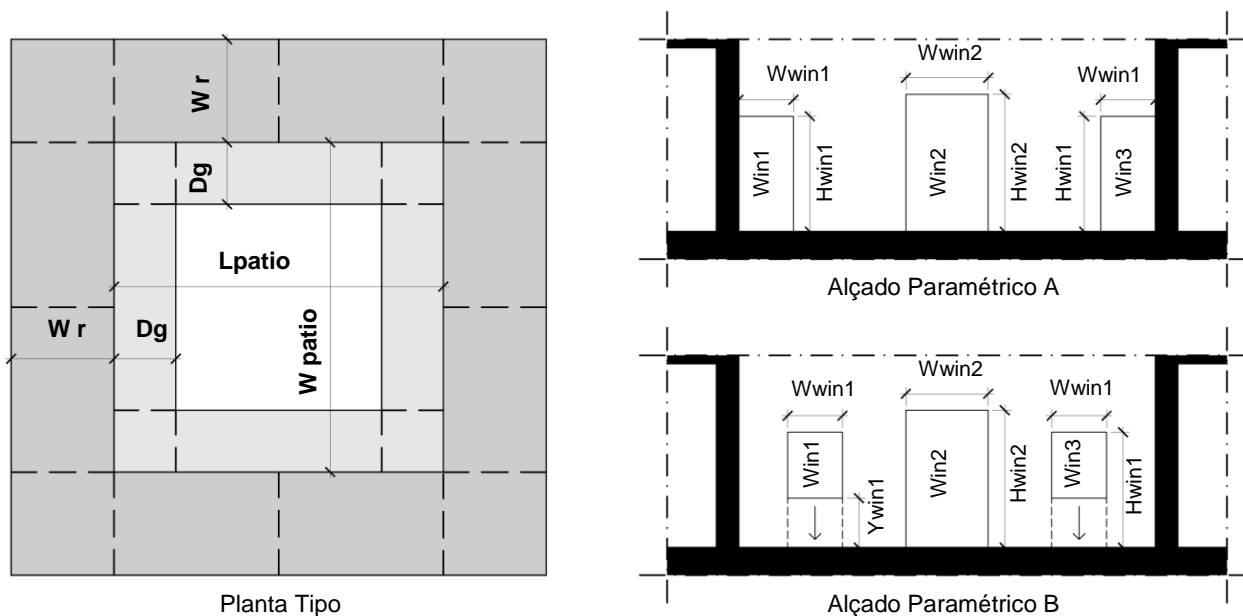


Figura 4.28 – Parâmetros Variáveis Dimensionais. Note-se que devido à simetria dos alçados as dimensões do vão W_{win3} são iguais às do vão W_{win1} .

4.4.5.2 Parâmetros Variáveis Particulares

Estas variáveis codificam cada sala da Casa Pátio Marroquina. Os parâmetros definidos anteriormente, conjuntamente com a aplicação das regras, irão estabelecer o conjunto de condições que irão determinar o resultado destas variáveis.

A identificação dos parâmetros variáveis particulares é fundamental porque é através da atribuição destas variáveis que se parametriza o Modelo Básico Inicial.

O modelo inicial é constituído por dois tipos de sala: as salas de canto e as salas intermédias. No DOE 2.1 tem de se definir o eixo coordenado de cada sala. Para o efeito utilizou-se a nomenclatura dada às paredes, como pode ser observado na Figura 4.29.

A partir da origem dos eixos coordenados de cada sala é possível determinar a sua posição em relação à origem da Casa Pátio, o azimute de cada sala – ângulo positivo gerado pela posição do eixo Y da sala em relação ao eixo Y da Casa Pátio – e determinar a origem dos eixos coordenados de cada um dos alçados das paredes de cada sala. Sabendo as origens dos alçados determinou-se o azimute de cada parede através da medição do ângulo positivo formado pela normal ao plano de cada alçado com o eixo coordenado da sala.

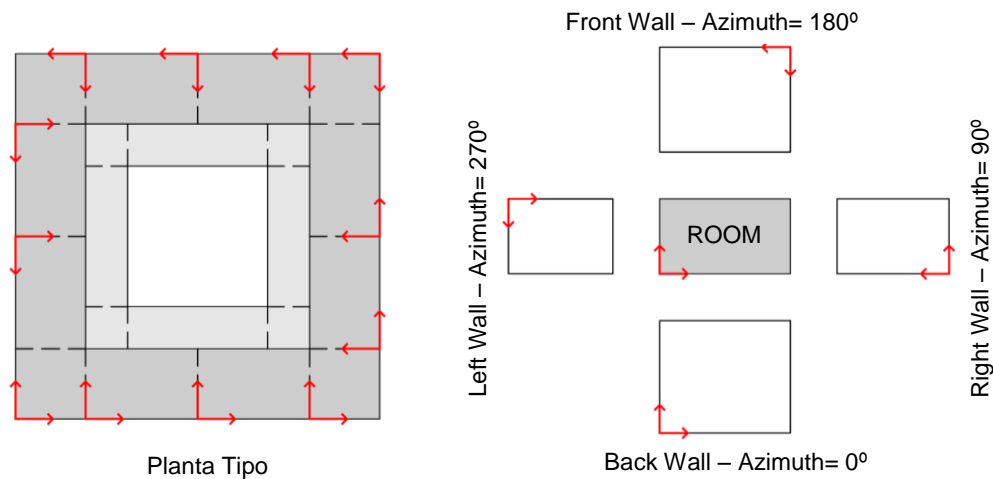


Figura 4.29 – Eixos coordenados das salas e nomenclatura das paredes de cada sala. À esquerda eixos coordenados das salas. À direita método de atribuição do nome das paredes e determinação do seu azimute para qualquer sala.

Apesar de possuímos dois tipos de sala diferentes encontramos aspectos comuns na sua codificação pois, para se definir um determinado espaço, existem requisitos constantes. Assim convém determinar, numa primeira fase, quais são os parâmetros comuns e como se comportam. Para modelar e simular a análise térmica e lumínica de cada espaço requer-se a definição dos seguintes parâmetros:

Space Function – este parâmetro define a função de cada espaço. O Modelo Básico Inicial contempla a existência de três tipos de ocupação, a sala (*room*), a entrada (*lobby*) e as escadas (*staircase*). Dependendo da sala em questão este parâmetro variável possui uma função específica. Se a sala em questão for a *Room 1* a sua função será sempre a de entrada (*lobby*). Se outro compartimento pertencer à primeira e quarta ala poderá funcionar como uma sala (*room*) ou como caixa de escadas (*staircase*). Para se determinar a função do compartimento, neste caso teve de se definir posteriormente a posição das escadas nas alas 1 e 4, contemplando três cenários possíveis: quando a ala 1 e a ala 4 existem simultaneamente; a ala 1 existe e a ala 4 não; e a ala 1 não existe mas a ala 4 sim. Se nenhum dos casos anteriores se verificar a função da sala será sempre igual a *room*.

Area e Volume – Dependem das dimensões em planta de cada sala, WRn^{22} e LRn^{23} . Tal como foi estipulado para as dimensões do pátio, WRn – *Width of the Room* – é a distância medida ao eixo dos X da sala, enquanto que LRn – *Lenght of the Room* – é a dimensão no eixo Y (Figura 4.30). O parâmetro *Area* é determinado pelo produto, $WRn \times LRn$, enquanto que o volume é igual ao produto, $WRn \times LRn \times Floor Height$. A parcela *Floor Height* é igual à altura definida no modelo básico inicial para cada piso: 3,73m. *Wr* e *Lr* dependem do tipo de sala em estudo pelo que serão tratados mais adiante.

²² Onde W abrevia *Width*, R é a abreviatura de *Room* e n corresponde ao número que identifica a sala no padrão básico.

²³ Onde L abrevia *Lenght*, R é a abreviatura de *Room* e n corresponde ao número que identifica a sala no padrão básico.

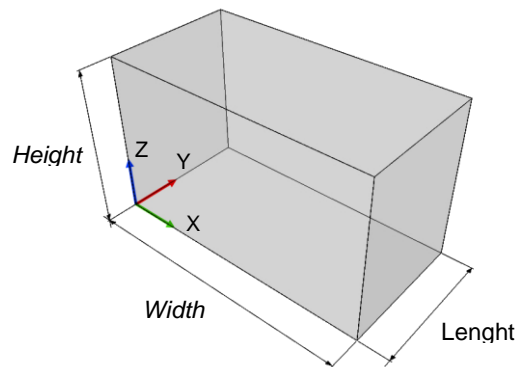


Figura 4.30 – *Width, Length e Height* de uma sala tipo.

DayLight Sensors – para efectuar a análise lumínica o DOE 2.1 requer a especificação da posição de sensores específicos que irão medir a quantidade de luz natural da sala. Neste estudo foi contemplada a existência de dois sensores lumínicos por sala alinhados num eixo central disposto sobre a maior dimensão, e posicionados de modo equidistante. A localização de cada sensor é definida através de uma coordenada X, Y e Z em relação à origem do eixo coordenado da sala em estudo. A coordenada Z é uma constante igual a 0,90m, altura comum a um plano de trabalho. As coordenadas X e Y dependem do comprimento e da largura da sala pelo que são variáveis.

People-Per-Area – para o cálculo térmico de cada espaço é importante definir densidade de utilização. Como a maior parte das salas é de carácter multifuncional determinou-se um rácio de pessoas por área. Estipulou-se que uma pessoa ocuparia cerca de 2,25m² de área, o que corresponde a um quadrado de 1,50m de lado.

Tendo determinado aspectos comuns a todas as salas, há que distinguir os parâmetros particulares respeitantes aos dois tipos de salas existentes, as salas de canto e as salas intermédias. Efectuou-se esta diferenciação porque ambas possuem um comportamento generativo específico. De seguida apresentam-se as particularidades dos diversos parâmetros para cada tipo de sala:

Sala de Canto

Cada sala de Canto é constituída por três paredes exteriores e duas paredes interiores potenciais. Teve de contemplar-se uma parede exterior extra porque a sala de canto pode não estar em contacto com duas alas em simultâneo.

Quando as salas de canto estão em contacto com duas alas em simultâneo podem possuir duas orientações possíveis: ou desenvolvem-se sobre o eixo das abcissas (X) ou sobre o eixo das ordenadas (Y). Nestes casos a orientação é determinada por uma variável auxiliar que determina a disposição sobre a horizontal ou sobre a vertical da *ROOM 1*. Só se aplicou este método na *ROOM 1* por causa do princípio de bissimetria das salas de canto definido na Regra 15. Quando existem simultaneamente a ala 1 e ala 4 a orientação da *ROOM 1* é determinada pela variável **R1POSITION** que, conforme o valor ditado pelo AG, irá dispor a *ROOM 1* sobre a vertical ou sobre a horizontal. É a orientação vertical e horizontal da *ROOM 1* que define o tipo de alçado paramétrico aplicado em cada fachada do Pátio, conforme a Figura 4.31 ilustra.

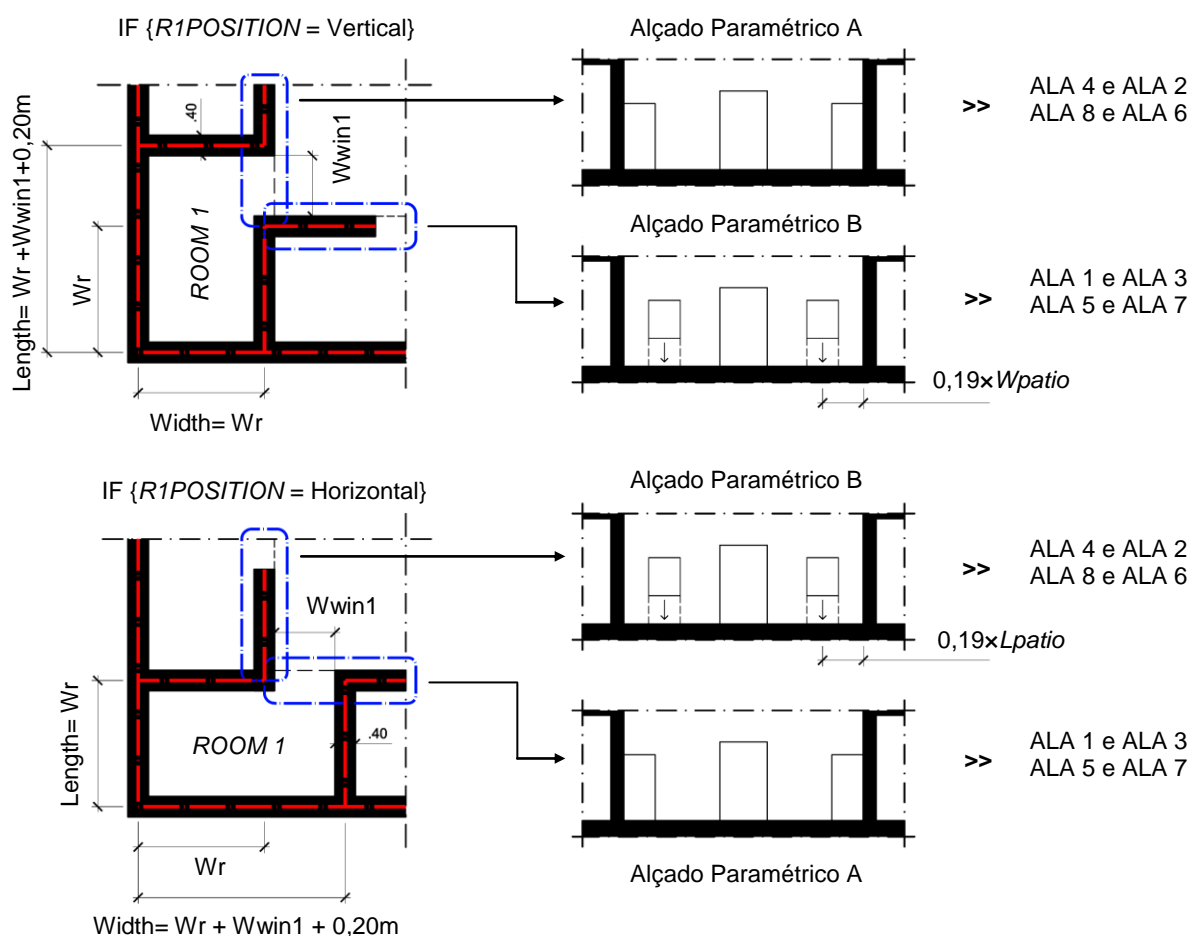


Figura 4.31 – Orientações possíveis da *ROOM 1*, conseqüente atribuição dos Alçados Paramétricos às diferentes alas e determinação da *Width* e da *Length* da *ROOM 1*.

O comando "janela" só poderá ser invocado no âmbito do comando "parede exterior". A definição das janelas, efectuada nos parâmetros variáveis gerais, é essencial na configuração geométrica das salas, pois são elas que regulam as suas dimensões planimétricas. A Regra 16 impõe que as salas de canto alinhem sempre pelo primeiro vão lateral do alçado da ala onde existem. Como está demonstrado na Figura 4.31 as variáveis do comprimento e da largura da *ROOM 1* são determinadas a partir da disposição da sala e do comprimento do vão.

A Regra 15 e a Regra 10 obrigam, respectivamente, que todas as salas de canto e todos os alçados do pátio são bissimétricos. Daqui resulta que todas as salas de canto do piso 0 serão iguais à *ROOM 1* e as do Piso 1 serão iguais à *ROOM 13*. Mesmos nos casos onde a Regra 15 não pode ser cumprida (1º Caso Excepcional) o método aplicado na determinação das dimensões das salas de canto é o mesmo. Apenas mudam algumas dimensões, pois o alçado, onde a sala de canto excepcional se encontra, é paramétrico do Tipo B. A Figura 4.32 exemplifica como se determina a *Width* de uma sala de canto excepcional no piso 0.

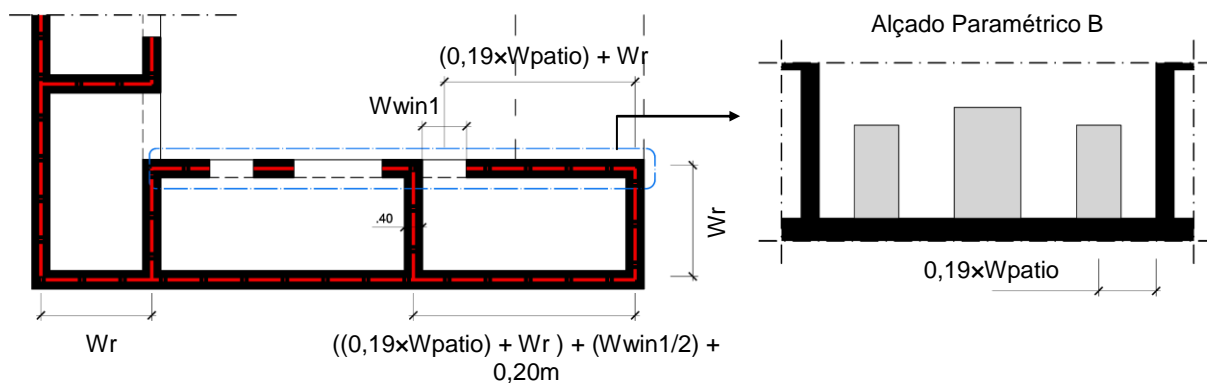


Figura 4.32 – Determinação da *Width* de uma sala de canto do 1º Caso Excepcional. A sala retratada nesta figura é a *ROOM 4*.

Como a Regra 1 impõe a existência de todas as salas de canto no piso 0 seleccionaram-se as janelas destas salas para se poder gerar as galerias do piso 0. As galerias que compõem a loggia que rodeia o pátio, foram simuladas no DOE 2.1 através do comando *OVERHANG* (OH) que modela uma pala de sombreamento, sempre associada a um vão. O comando *OVERHANG* só pode ser invocado dentro do comando "janela". Assim sendo, estabeleceu-se que a *ROOM 1* pudesse gerar a G4, a *ROOM 4* a G1, a *ROOM 7* a G2 e a *ROOM 10* a G3. A atribuição de cada uma das galerias às salas de canto teve em consideração a orientação positiva do eixo coordenado de cada alçado, para que deste modo se pudesse sempre atribuir um valor positivo ao comprimento da galeria.

Pode dar-se o caso da parede e da janela, onde a galeria se deveria localizar, não existir, pois a sua existência depende da orientação vertical ou horizontal da sala de canto. Todavia, a parede e o vão inexistentes, nessas situações, estão sempre considerados no código que descreve o Modelo Básico Inicial (apenas os valores que definem a sua geometria são iguais a zero). Desta maneira garante-se sempre a possibilidade das galerias serem geradas mesmo em casos onde a sua parede, e conseqüentemente o seu vão, não existam. Este caso é um bom exemplo de como a aparente rigidez do Modelo Básico Inicial descrito no DOE 2.1 confere uma grande flexibilidade ao processo generativo.

A Figura 4.33 ilustra quais são os parâmetros necessários para definir uma galeria. O parâmetro OH-A mede a distância do arranque da galeria em relação à origem do vão no eixo x. Como se estabeleceu que o início da galeria alinha sempre com a origem do vão OH-A é sempre igual zero. Todos os outros parâmetros são variáveis. Salienta-se o parâmetro OH-D, igualado a zero quando a galeria não existe, ou igual a *Dg*, quando a galeria existe.

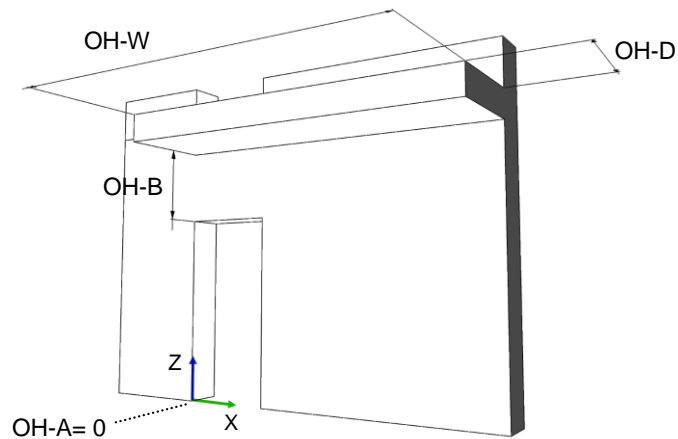


Figura 4.33 – Definição de uma galeria através das variáveis imputadas ao comando *OVERHANG* (OH).

As salas de canto do piso 0 podem possuir tectos ou coberturas, dependendo da existência ou não das suas salas congêneres do piso 1. Existem três possibilidades de interacção entre os tectos da sala de canto do piso 0 e a sua sala análoga, localizada no piso superior. A Figura 4.34 A) retrata o caso onde existe uma sala no piso 1 orientada da mesma maneira do que a sala do piso 0, porque as alas existentes no piso superior coincidem com as existentes no piso inferior. Nesta situação a sala do piso 0 possuirá somente um tecto interior com uma área igual à da sala. Por seu lado a Figura 4.34 B) corresponde ao 2º Caso Excepcional, previamente descrito, onde a sala de canto do piso 1 não pode mimetizar a configuração da sala que lhe é adjacente do piso 0, por causa da inexistência de uma ala no piso superior. Neste caso a sala de canto do piso 0 possuirá um tecto interior e uma cobertura em simultâneo. A área do tecto será igual à área da sala do piso superior ($W_r \times W_r$) enquanto que a cobertura possuirá as dimensões sobrantes. Finalmente a Figura 4.34 C) define o caso onde no piso superior não existe nenhuma sala de canto. Neste caso a sala do piso 0 não possuirá tecto interior e a sua cobertura terá as mesmas dimensões da sala.

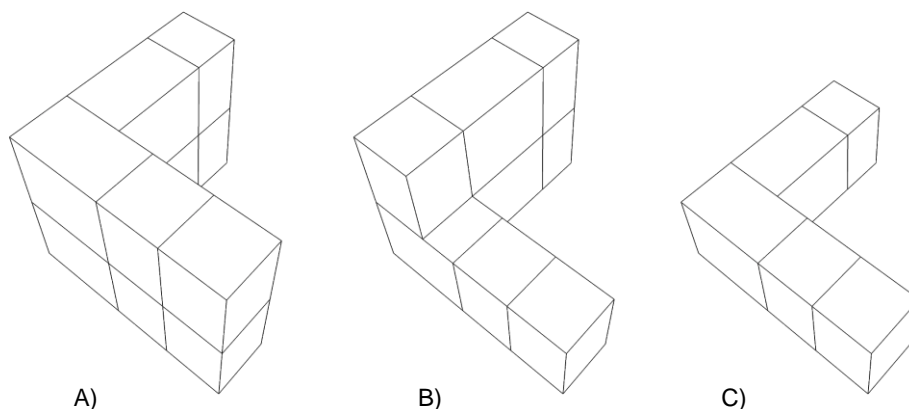


Figura 4.34 – Possibilidades de interacção entre o tecto de uma sala de canto do piso 0 com a sua congênera do piso 1.

O comportamento dos parâmetros das salas de canto do piso de cima é em tudo semelhante aos do piso 0. Ao nível das suas variáveis particulares as únicas diferenças são: a largura do vão lateral que ajuda a determinar as dimensões das salas de canto pode ser diferente, pois o seu valor é dado por uma variável geral específica; as salas de canto do piso 1 não possuem tectos somente coberturas; os pavimentos das salas de canto do piso 1 são do tipo *Floor*, específico para pavimentos interiores, possuindo a mesma área que a sala, pois no piso inferior existirá sempre uma sala análoga devido à aplicação da Regra 3.

Sala Intermédia

Estas salas encontram-se confinadas entre salas de canto assumindo por isso um comportamento mais estático visto que a sua orientação não se altera. Cada sala intermédia possui sempre duas paredes exteriores e duas paredes interiores. A sala intermédia pode ocupar toda a frente do pátio possuindo no máximo três vãos, caso a ala onde se localiza não possua nenhuma sala de canto. Este facto torna a *Width* (WR_n - n é o índice numérico da sala) deste tipo de sala muito mais elástica do que nas salas de canto, enquanto que a *Lenght* (LR_n - n é o índice numérico da sala) varia entre dois valores: Wr (Largura do 2º anel) – caso a ala, onde as salas intermédias em estudo se localizam, exista; ou 0 – quando a ala não existe. A divisão das alas em salas intermédias depende da maneira como as salas de canto estão dispostas. Se determinada ala possui uma ou duas salas de canto o espaço residual pode conter apenas uma sala intermédia. Deste modo, garante-se sempre a observação da Regra 14 pelas soluções passíveis de serem geradas pelo processo generativo. A Figura 4.35 demonstra como se calcula as dimensões das salas intermédias nesta situação.

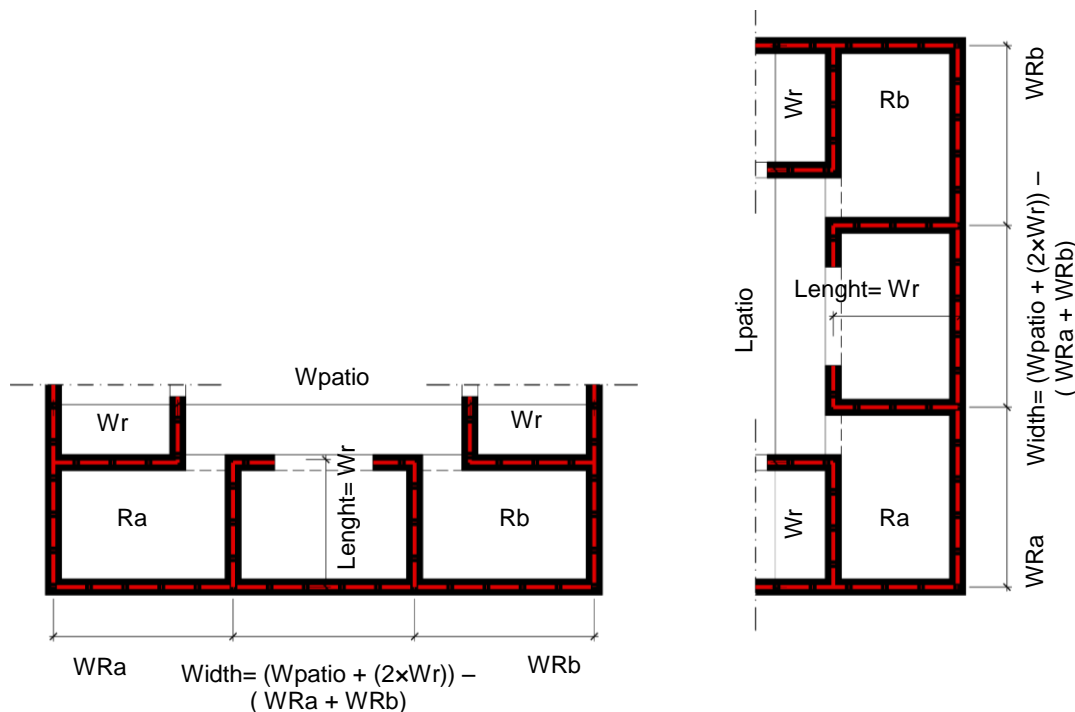


Figura 4.35 – Dimensões para a sala intermédia quando existem duas salas de canto na sua ala. À esquerda apresenta-se o método de determinação das dimensões para as Alas 1, 3, 5 e 7 enquanto que à direita para as Alas 2, 4, 6 e 8.

Se, pelo contrário, a ala não possui nenhuma sala de canto, a sua frente pode ser dividida em duas salas: a primeira ocupa de modo livre a ala enquanto que a segunda ocupa o espaço restante. Como foi estabelecido no Modelo Básico Inicial, o alçado atribuído aos casos onde a ala não possui nenhuma sala de canto é sempre um alçado paramétrico do Tipo B. De modo a regular a divisão da ala em duas salas intermédias foi concebida uma variável auxiliar de comportamento independente denominada de AUX_Rn , (n é o índice numérico atribuído à primeira sala intermédia de cada ala). O valor gerado pelo AG para AUX_Rn determina o limite da primeira sala intermédia em quatro posições possíveis, tendo em conta a largura dos vãos e o seu posicionamento no Alçado Paramétrico B conforme se pode observar na Figura 4.36. Após ter-se determinado a posição da parede limite é possível determinar as dimensões das salas intermédias implementando um método de cálculo semelhante ao utilizado no caso anterior.

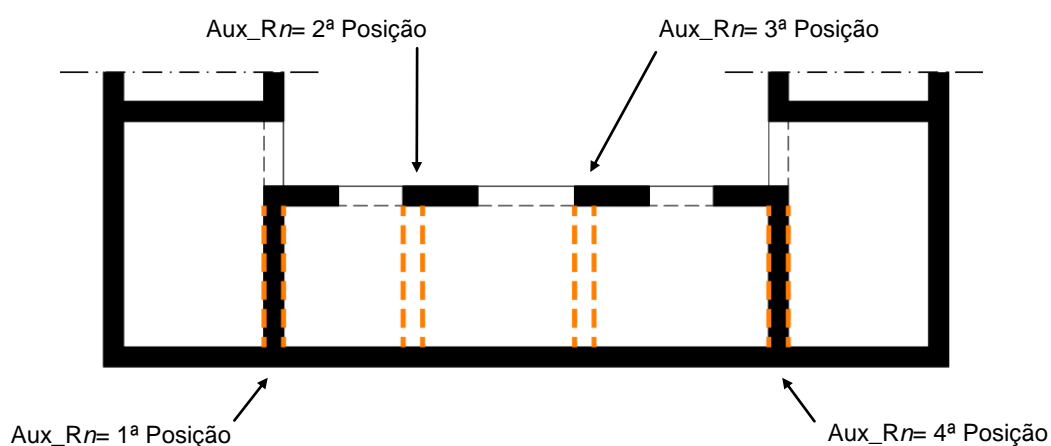


Figura 4.36 – Divisão das alas, que não possuem salas de canto, em salas intermédias. A divisão da ala é regulada pela variável independente Aux_Rn .

De modo a respeitar a Regra 14, só no caso de uma das salas intermédias ocupar toda a frente do pátio é que os seus vãos laterais podem não ser de sacada, visto que o vão central garante o acesso à sala pelo pátio.

As salas intermédias podem possuir tecto interior e cobertura mas nunca em simultâneo. Se existir no piso 1 uma ala sobre a sala intermédia do piso 0, a sala intermédia possuirá um tecto interior, cuja área será a da sala. Se porventura não existir nenhuma ala superior sobre a sala esta não terá um tecto mas uma cobertura, cujo comprimento e largura serão idênticos aos da sala.

No piso 1, tal como as salas de canto, as salas intermédias, se existirem, possuem somente uma cobertura (*ROOF*) e um pavimento interior (*FLOOR*). Conforme o estipulado pela Regra 18 as salas intermédias do piso 1, se a sua respectiva ala existir, seguem o mesmo esquema de configuração das suas salas congéneres do piso 0 apenas se diferenciando destas no valor da sua *Width*, devido à possível diferença de valores entre vãos do piso 0 e do piso 1.

Todos os outros parâmetros variáveis particulares, como origem dos eixos das paredes, janelas e galerias, dimensões de paredes que não contactem com o pátio, etc., são facilmente codificados a partir de uma leitura atenta do Modelo Básico Inicial e dos valores dos parâmetros variáveis gerais e particulares descritos até aqui.

4.4.6 – Modelo Experimental

Após ter definido o Modelo Básico Inicial, as regras que guiam o processo generativo e o comportamento possível que as diversas variáveis podem tomar, houve a necessidade de testar o código que descreve o Modelo Básico Inicial. O teste consiste em substituir os parâmetros variáveis por dados alfanuméricos de maneira a modelar uma Casa Pátio, concebida com dois pisos, todas as alas e todas as galerias. A *ROOM 1* está disposta na horizontal localizando-se na Ala 1. A *ROOM 4* é simétrica à *ROOM 1*. As alas que não possuem salas de canto estão divididas em duas salas. A Ala 3 é simétrica em relação à Ala 1 e o mesmo acontece em relação às Alas 2 e 4. O piso 1 é exactamente igual ao piso 0. A Figura 4.37 retrata a Casa Pátio concebida para o Modelo Experimental.

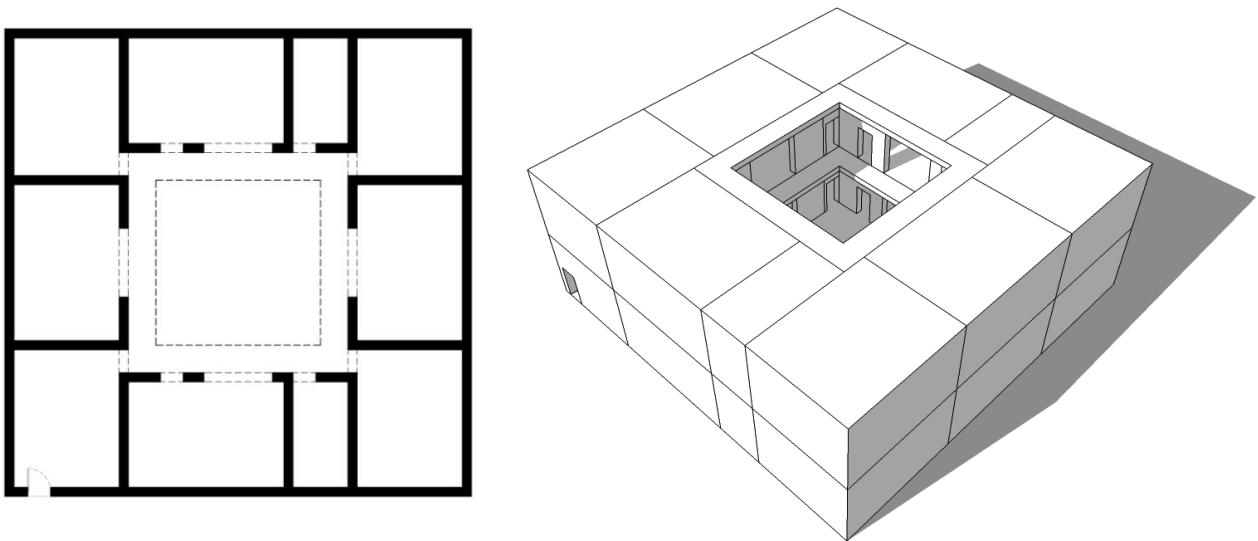


Figura 4.37 – Casa Pátio concebida para testar o Modelo Inicial Básico. À esquerda a planta do piso 0 e à direita uma perspectiva geral. A única diferença entre pisos é a porta de entrada no piso 0.

A metodologia aplicada testou cada sala modelada, identificando-se e corrigindo-se possíveis erros. Depois incrementava-se o código da sala seguinte, aplicando o mesmo método na identificação e correcção de possíveis erros. Este processo foi aplicado de maneira iterativa a todas as salas. A Figura 4.38 mostra a evolução do processo.

A implementação do Modelo Experimental, e a metodologia aplicada na identificação e correcção dos erros de codificação, teve como resultado um código que descreve de modo eficiente o Modelo Básico Inicial.

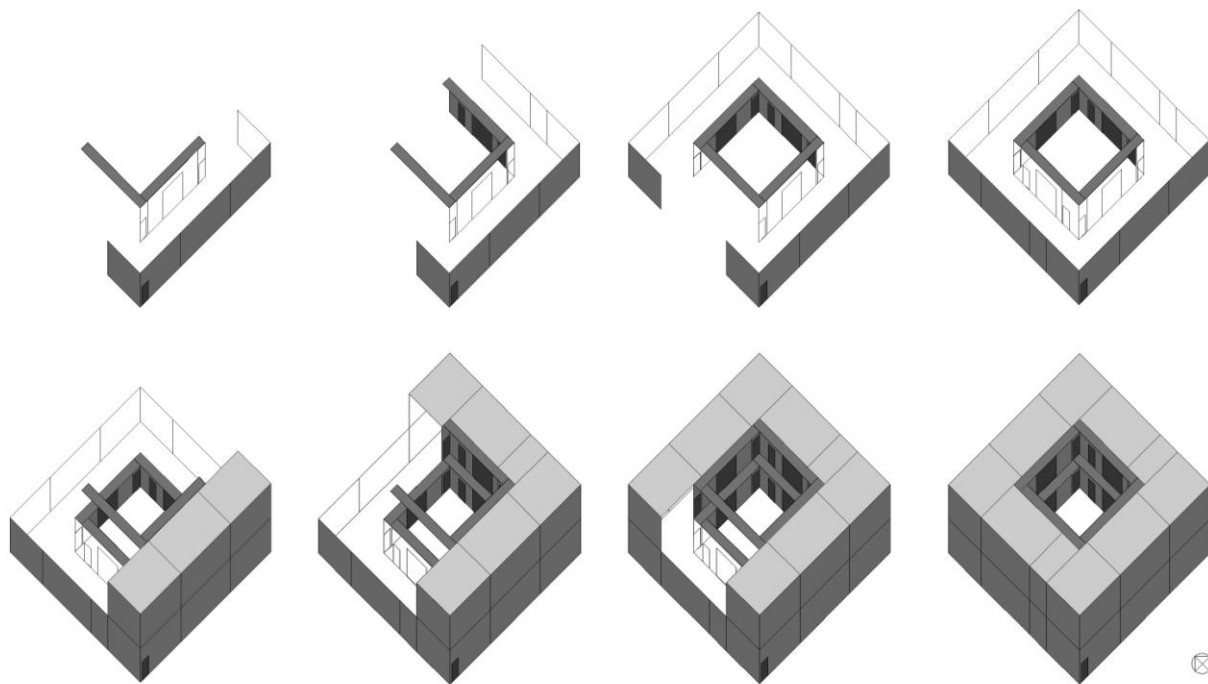


Figura 4.38 – Sequência de Axonometrias que mostram a evolução da implementação do Modelo Experimental, ala a ala.

5. Conclusão

5.1 Sumário

Esta dissertação debateu o paradigma teórico e algumas questões de implementação prática envolvidas na elaboração de projectos recorrendo a aplicações computacionais. Procurou-se demonstrar que os Sistemas Generativos de Projecto (SGP) são as ferramentas digitais mais adequadas a uma abordagem baseada na experimentação, fundamentada e sustentada do Projecto de Arquitectura. O emprego destas ferramentas permitiu efectuar uma exploração formal menos empírica e arbitrária, pois a evolução da concepção formal foca-se em objectivos e metas a que o projecto se compromete a atingir.

Numa primeira fase, a tese reflecte o aprofundamento e síntese de questões teóricas e conceptuais subjacentes à prática de projecto suportada pelo computador para, de seguida, aplicar os conceitos teóricos desenvolvidos ao consolidar para um SGP particular, o Gene_Arch (Caldas, 2006), uma metodologia de parametrização analítica para a Casa Pátio da Medina de Marrakech. A parametrização diz-se analítica porque se baseia num conjunto coerente que forma um *corpus* arquitectónico singular e coerente. A metodologia proposta consistiu num complexo exercício de síntese onde, por um lado, se demonstrou como se incorpora na ferramenta computacional características arquitectónicas de um *corpus* estilístico coerente, de natureza vernacular e complexa, e por outro, que é possível conceber soluções arquitectónicas coerentes emergentes através da definição de regras e restrições de ordem lógica e/ou matemática, provando deste modo, tal como Stiny (1989) defende, que um projecto consiste em relações entre conceitos, formas e partes que compõem um todo tridimensional coerente. Ao assimilar características arquitectónicas, os SGP ampliam a capacidade de pesquisa de alternativas, a criatividade no desenvolvimento de projectos e a consolidação de estratégias adoptadas contribuindo deste modo para o aprofundamento do conhecimento teórico ou prático dos problemas abordados em cada projecto.

O desenvolvimento do projecto apoiado por SGP dependerá sempre da percepção do arquitecto sobre o problema particular em estudo, como o apresenta e de que maneira pretende formular a resposta, ou seja, qual o registo arquitectónico onde a solução se deve enquadrar. Os SGP apenas irão explorar, de modo mais eficiente, o espaço de solução considerando as múltiplas alternativas de resolução, nas quais estarão necessariamente espelhadas as intenções arquitectónicas formuladas pelo arquitecto, para obter, tendencialmente, as soluções de melhor desempenho para as condicionantes de projecto.

Os três exemplos de SGP estudados e as aplicações práticas abordadas demonstraram que o conceito teórico metodológico de *goal oriented design*, produzem um efeito pragmático e útil no desenvolvimento projectual. Ao se integrar processos generativos com algoritmos de optimização, o computador é não só capaz de conceber um número indefinido de soluções formais, como de orientar essa pesquisa de modo atingir os critérios de desempenho pretendidos. Os resultados apresentados por cada um dos SGP provaram a capacidade que estes programas possuem para assimilar intenções arquitectónicas e cumprir critérios de projecto, gerando para tal um leque variado de

soluções que muito dificilmente teriam sido considerados com recurso a outros métodos. Para além da variedade e diversidade das soluções encontradas, verificou-se que muitas soluções apresentadas eram de carácter emergente, ou seja, dificilmente seriam consideradas como possíveis alternativas de resolução do problema projectual.

O AudiOptimization aposta numa relação interactiva entre o utilizador humano e a máquina pois a formulação do seu processo generativo e de optimização baseia-se numa selecção e discretização das diversas variáveis passo a passo. Esta parametrização menos autónoma proporciona um controlo por parte do utilizador mais interventivo e minucioso de todo o processo. O interface gráfico recorre a diferentes esquemas e visualizações do modelo, facilitando um domínio e controlo do processo generativo e de optimização. Contudo, a formulação do problema de optimização e do processo generativo apoia-se muito numa primeira abordagem aos resultados da simulação acústica do modelo inicial elaborada pelo utilizador. Isto torna a formulação do problema de optimização muito dependente de uma opinião pessoal que muito provavelmente será influenciada pela experiência e a percepção que o elemento humano possui do problema.

No caso do EifForm, verificamos uma maior autonomia devido, sobretudo, ao recurso a gramáticas de forma como processo generativo. Ao contrário da discretização paramétrica de variáveis, passo a passo, as gramáticas de forma baseiam-se em processos algoritmos constituídos por regras de transição cujos resultados são indefinidos à partida. Além disso, foram aplicados critérios baseados em processos estocásticos, ou seja, determinados por preceitos probabilísticos, durante o processo de selecção do método STSA (*Standard Topology and Simulated Annealing*) de modo a evitar que o processo de optimização se foque numa zona específica do espaço de solução, assegurando assim uma maior diversidade e um carácter emergente das soluções encontradas. Este SGP além de poder ser aplicado a um vasto leque de estruturas pode otimizar as estruturas sob diferentes pontos de vista (como visuais, dimensionais, económicos, etc.) através da redefinição da Função Objectivo a aplicar. Este SGP requer sempre a concepção de um modelo inicial e uma gramática de forma específica para a estrutura em estudo o que, como se pode depreender, dificulta a formulação do problema e inibe um uso mais generalizado. Para solucionar esta questão Shea e Aish (2003, 2005) estudaram a integração, via modelos XML, do EifForm com um programa de modelação paramétrica e associativa que permite programação, o *Generative Components* (GC). Esta integração facilitou a concepção do modelo inicial e a formulação do problema generativo e de optimização através da concepção de modelos interactivos e dinâmicos onde uma alteração efectuada pelo EifForm ao modelo inicial implica uma actualização automática no modelo do GC e uma alteração do modelo do GC implica necessariamente uma nova rotina de optimização no EifForm. Esta reciprocidade entre os dois programas incentiva e potencia a capacidade exploratória do problema de projecto permitindo a consideração de múltiplos cenários de optimização.

O Gene_Arch, por seu lado, foca-se no objecto arquitectónico, possuindo um âmbito de aplicação extenso, pois além de poder abranger quase todo o tipo de edifícios pode ser aplicado a uma multiplicidade de intervenções arquitectónicas, indo desde a composição das fachadas, dimensionamento de vãos, selecção de disposições construtivas, até à manipulação formal. Este SGP pretende minimizar os gastos energéticos relacionados com a iluminação artificial e com

sistemas de aquecimento/arrefecimento dos espaços interiores através da manipulação da forma do edifício, da sua materialidade e da, localização e dimensionamento das suas fenestraçãoes. A optimização do consumo energético dos edifícios permite a este SGP abordar a questão da sustentabilidade na concepção do projecto, contribuindo para uma maior adequação das soluções arquitectónicas e para a construção de um meio construído mais equilibrado, justo e ciente dos grandes desafios que enfrentamos como civilização, nomeadamente os relacionados com o aquecimento global e a degradação sistemática do nosso meio ambiente. O carácter multifacetado da Função Objectivo – Consumo Energético Anual ou Intensidade do Uso Energético – deste SGP engloba os aspectos térmicos e lumínicos dando uma resposta integrada e eficaz a um problema multi-critério onde as estratégias de optimização aplicáveis a cada factor de desempenho são claramente contraditórias. Para dar resposta a problemas multi-critério de complexidade crescente (Caldas 2002b, 2005) incorpora Algoritmos Genéticos do tipo Pareto (AGP), como suporte do processo generativo e como técnica de optimização, de modo a aplicar um método que vai ao encontro das soluções cujo desempenho global é mais equilibrado. Esta particularidade do Gene_Arch aproximam-no à próxima geração de SGP, os Sistemas Generativos MultiPerformativos de Projecto (Fasoulaki, 2008), que pretendem conceber resultados optimizados para diferentes critérios de desempenho.

No domínio da sua aplicação prática, o Gene_Arch demonstrou ser fiável, capaz de incorporar intenções e conceitos arquitectónicos e gerar soluções diversificadas e de carácter emergente. A diversidade dos resultados advém do seu processo generativo e de optimização ser suportado por Algoritmos Genéticos (AG). O processo generativo consiste na parametrização apoiada por AG o que a torna, ao contrário do AudiOptimization, muito autónomo e independente. Os AG também são as ferramentas algorítmicas utilizadas na optimização das soluções encontradas durante o processo generativo. Os processos estocásticos destas técnicas viabilizam a emergência de configurações inovadoras durante a pesquisa heurística do espaço de solução. Os resultados inovadores apresentados pelo Gene_Arch permitem-nos aprofundar, ampliar e consolidar os conhecimentos teóricos ou práticos que possuímos do complexo problema da térmica e da iluminação dos espaços arquitectónicos interiores.

Conclui-se que estas ferramentas não aumentam apenas a capacidade do uso do computador na elaboração de projectos como também expandem as capacidades humanas ao ampliar a nossa percepção do problema e do espaço de solução, ao confirmar ou desmentir pressupostos teóricos e/ou práticos e ao desvendar cenários desafiantes e hipóteses inovadoras em fases de concepção.

O paradigma de *goal oriented design*, enquadrado no conceito de arquitectura evolucionária, tal como ele é apresentado por Frazer (*cit. in* Kolarevic, 2000: 4), também redefine o actual papel do arquitecto. Com a aplicação de SGP, o arquitecto deixa de ser um executante de desenho, função que lhe consome a maior parte do tempo, para assumir um verdadeiro papel de síntese, focando-se em tarefas mais criativas como guiar o processo de criação e de selecção, operado pela máquina, formular o problema (ou seja as questões essenciais inerentes a cada projecto), o processo generativo (como se deverá expressar a resposta, através da definição de restrições) e os vectores de optimização (para onde a solução deverá convergir). Por analogia, o arquitecto assume o papel da

“Natureza” no processo de selecção natural, ditando regras, restrições de modo a definir um “ambiente” a partir do qual as diversas configurações arquitectónicas possam surgir e evoluir, tendo como meta a optimização da sua performance. As tarefas de avaliação, redefinição do problema generativo e de optimização, tendo em conta resultados anteriores, bem como a selecção da evolução de determinados tipos de solução vão possuir um peso cada vez mais significativo no trabalho do arquitecto.

É no âmbito da redefinição do papel do arquitecto que o caso de estudo aborda a formulação da metodologia de parametrização analítica para o Gene_Arch. Ao formular e consolidar um processo generativo, que ultrapassa as metodologias previamente aplicadas (Caldas, 2006) a edifícios singulares, para tipologias arquitectónicas, abordou-se inevitavelmente o papel que o arquitecto terá na aplicação deste tipo de sistemas. A parametrização apresentada demonstra que é possível derivar soluções arquitectónicas estilisticamente coerentes a partir de um modelo básico paramétrico associado a um conjunto de regras e restrições que codificam as relações e intenções arquitectónicas, implícitas ou explícitas, presentes num determinado *corpus* arquitectónico.

Tendo isto em conta, a metodologia proposta de parametrização analítica para o Gene_Arch assenta nos seguintes passos:

1) Análise Volumétrica, da Composição dos Alçados e da Compartimentação interior – pretende-se enquadrar e definir o objecto de estudo ao identificar características implícitas e explícitas;

2) Modelo Inicial Básico – após a análise é possível estabelecer um padrão tipo que pode ser derivado para a formulação de qualquer solução que se enquadre dentro das características que definem a tipologia ou *corpus* arquitectónico. Este modelo é descrito num código que será executado no DOE 2.1. E, simulador de desempenho térmico, lumínico e energético incorporado no Gene_Arch, que será parametrizado *a posteriori*.

3) Regras e Restrições – derivam directamente da análise efectuada ao conjunto arquitectónico e têm em conta as possibilidades de transformação do padrão básico. As regras e restrições definem limites à parametrização garantindo deste modo a coerência estilística das soluções geradas;

4) Identificação e Codificação dos Parâmetros variáveis – a partir do modelo básico inicial e tendo em consideração as limitações impostas pelas regras estabelecem-se os parâmetros variáveis do Modelo Básico Inicial e define-se o seu comportamento através de técnicas de programação.

5) Objectivo de desempenho – como o SGP em causa é o Gene_Arch, o objectivo de desempenho só poderá ser a minimização do consumo energético. Como o processo generativo proposto é capaz de operar extensas modificações formais ao Modelo Inicial Básico a Função Objectivo mais adequada será a Intensidade de Uso Energético, pois permite comparar a performance energética entre edifícios de diferentes escalas.

Apesar desta metodologia ter sido especificamente desenvolvida para o Gene_Arch os seus pontos essenciais – análise, padrão inicial, formulação de regras, codificação de parâmetros variáveis

– poderão ser aplicados a outros programas de arquitectura evolucionária ou SGP, pelo que se pode concluir ser bastante abrangente, com capacidade de adaptação a outros cenários e, logo, útil.

5.2 Futuros Desenvolvimentos

No capítulo geral, apesar dos SGP serem as ferramentas digitais de suporte à elaboração de projectos mais adequadas até ao momento, o seu carácter relativamente recente e desenvolvimento quase que embrionário permite bastantes possibilidades de melhoramento. Um aspecto a melhorar é o interface homem-máquina. Por agora, é necessário um conhecimento substancial de programação para se dominar e aplicar a maior parte destas ferramentas. Por isso, é importante desenvolver técnicas que melhorem os interfaces no intuito de uma manipulação mais fácil e intuitiva para uma aplicação mais generalizada. Outro objectivo muito específico prende-se com a capacidade de cada SGP resolver um problema em concreto, direccionando a pesquisa formal para a optimização de um cenário de performance concreto. Porém, o projecto de um edifício contempla a soma de diferentes problemas. Para responder a esta limitação é possível antever duas soluções: a aplicação integrada de diferentes SGP na elaboração dos diferentes projectos que definem os edifícios ou então a concepção de Sistemas Generativos Multi-Performativos, que expandem a capacidade de pesquisa dos actuais SGP tendo em vista uma optimização simultânea de diferentes objectivos do projecto em estudo. Tais sistemas possuíram a vantagem de integrar de modo equilibrado e sustentado as diferentes disciplinas que intervêm no projecto de um edifício. Depreende-se que devido à complexidade inerente à sua concepção não iremos ter para breve ferramentas efectivas, contudo já existe pesquisa efectuada nesse âmbito (Fasoulaki, 2008).

No que concerne às dificuldades encontradas na metodologia de parametrização elaborada da Casa Pátio da Medina de Marrakech para o Gene_Arch, observou-se que quanto maior a complexidade e o número possibilidades contempladas no processo generativo maior a dificuldade de parametrizar o Modelo Básico Inicial. Isto prende-se com dois pontos: 1) apesar de se estar a desenvolver trabalho nesse sentido, ainda não é permitido restringir dinamicamente as variáveis de comportamento independente, ou seja, o intervalo deste tipo de variáveis ainda não pode ser determinado pelo valor de outras variáveis; 2) o outro factor refere-se à rigidez da estrutura do Modelo Inicial Básico. No que diz respeito ao primeiro ponto a possibilidade de se discretizar dinamicamente determinadas variáveis possibilitaria uma programação mais simples do problema generativo. Por outro lado, a estrutura fixa e descritiva do Modelo Básico Inicial implica sempre alguma simplificação imposta às suas possibilidades de transformação, para que seja possível elaborar a sua parametrização em tempo útil. No que diz respeito ao processo generativo sugerido, que transpõe as características e relações dum conjunto arquitectónico existente, esta simplificação pode inviabilizar a abordagem de padrões arquitectónicos ligeiramente diferentes, mas que se enquadram dentro do mesmo paradigma, porque para tal é necessário conceber outro modelo inicial e a respectiva parametrização. Para viabilizar uma parametrização mais complexa e autónoma é possível antever uma solução que se baseia em técnicas de meta programação. Um meta-programa é um programa que concebe outro programa ou código. A concepção de um meta programa que

descreve automaticamente o modelo básico no DOE 2.1 E facilitaria a parametrização de mais configurações iniciais e a exploração de frentes de solução mais diversificadas.

No que concerne à parametrização proposta nesta dissertação há que concluir o trabalho de depuração para se obter resultados e efectuar uma análise rigorosa aos mesmos com o intuito de perceber as estratégias utilizadas pelo Gene_Arch na resolução do problema projectual. Todavia é possível enumerar os seguintes desenvolvimentos e extensões : 1) introdução do 3ª anel - o anel de “negociação urbana”; 2) modelação de planos sombra que simulem as arcadas; 3) modelação de planos de sombra que simulem o contexto urbano envolvente à casa.

É importante realçar que, no desenvolvimento desta dissertação foi iniciado trabalho para a concepção de modelos arquitectónicos de génese contemporânea a partir do relaxamento das restrições e regras definidas nesta proposta de parametrização. Este futuro trabalho permitirá não só comparar as soluções contemporâneas com as suas congéneres vernaculares mas também conceber modelos híbridos que assimilam simultaneamente características tradicionais e actuais.

Por fim, também será importante desenvolver métodos de visualização mais avançados. Isto poderia ser efectuado através da formulação de rotinas em LISP para uma visualização mais rigorosa e pormenorizada dos resultados obtidos em programas CAD, facilitando a transposição de um modelo de simulação, de carácter mais abstracto, para um modelo mais rigoroso e detalhado. A interpretação de um modelo de simulação por um software CAD facilitaria a ligação com métodos de prototipagem rápida (PR). Os modelos físicos são indispensáveis para uma análise comparativa rigorosa pois como Caldas defende (Caldas, 2001: 5), os modelos físicos ainda constituem o método mais eficaz de avaliar os aspectos e componentes arquitectónicos das diversas soluções em estudo.

5.3 Contribuições

O trabalho efectuado permitiu definir e caracterizar conceitos chave bem como avaliar o novo paradigma metodológico na abordagem ao Projecto de Arquitectura envolvendo o uso de SGP, sintetizando e reunindo o conhecimento disperso e descontínuo da literatura existente. A parametrização analítica proposta para o Gene_Arch consolida o trabalho precedente e expande o processo generativo para a concepção de soluções enquadradas num paradigma tipológico. A análise crítica aprofundada permitiu apontar estratégias de melhoramento e futuros desenvolvimentos no domínio geral e particular no que se refere à metodologia e à parametrização proposta.

Bibliografia

Ahrens, C., Sprecher, A. e Neuman, E. (2006), *The Hylomorphic Project*, Disponível em: <http://music.calarts.edu/~cchaplin/movies/hylo.pdf> [22/05/2009].

Aranda, B. e Lasch, C. (2004), ARANDA/LASCH, Disponível em: <http://scriptedbypurpose.wordpress.com/participants/arandalasch/> [04/06/2009].

Caldas, L. e Norford, L. (1999), "A Genetic Algorithm Tool For Design Optimization" in: *Media and Design*, Salt Lake City: ACADIA'99, 29, pp. 260-261.

Caldas, L., Norford, L. e Rocha, J. (2001), "An Evolutionary Model for Sustainable Design" in: *Proceedings of PLEA'001*, Florianópolis, pp. 1-7

Caldas, L. (2002a), "Evolving Three-Dimensional Architecture Form: An application to low-energy design" in: Gero, J. (ed.), *Artificial Intelligence in Design'02*, Kluwer Academic Publishers, pp. 351-370.

Caldas, L. (2002b), "Pareto Genetic Algorithms in Architecture Design: An Application to Multicriteria Optimisation Problems" in: *Proceedings of PLEA'02*, Toulouse, pp. 37-45.

Caldas, L. e Norford, L. (2003), "Shape Generation Using Pareto Genetic Algorithms: Integrating Conflicting Design Objectives in Low-Energy Architecture", *International Journal of Architectural Computing*, Multi-Science Publishing Co Ltd, Volume 1, Cap. 4, Dezembro, pp. 503-261.

Caldas, L. (2005), "Three-Dimensional Shape Generation of Low-Energy Architectural Solutions using Pareto Genetic Algorithms" in: *Proceedings of eCAADe'05*, Lisboa: eCAADe, pp. 647-654.

Caldas, L. (2006), "GENE_ARCH: An Evolution-Based Generative Design System for Sustainable Architecture" in: *LNCS: Intelligent Computing in Engineering and Architecture*, Springer Berlin Heidelberg, Volume 4200/2006, pp.109-118.

Caldas, L. (2008), "Generation of Energy-Efficient Architecture Solutions Applying GENE_ARCH: An Evolution-Based Generative Design System" in: *Advanced Engineering Informatics*, Elsevier, Volume 22, pp. 647-654.

Daru, R. e Snijder, H.P.S. (1997), "GACAAD or AVOCAAD? CAAD and Genetic Algorithms for an Evolutionary Design Paradigm" in: *AVOCAAD First International Conference*, Bruxelas: AVOCAAD Conference Proceedings, pp. 145-161

Duarte, J. e Rocha, J. (2006), "A Grammar for the Patio Houses of the Medina of Marrakech. Towards a Tool for Housing Design in Islamic Contexts" in: *Communicating Space(s) Proceedings of the International Conference*, Volos, Bruxelas: eCAADe, pp. 860-866.

Duarte, J. (2007), *Personalizar a Habitação em Série: Uma gramática Discursiva para as Casas da Malagueira do Siza*, 1ª Edição, Fundação Calouste Glubenkian, Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

Duarte, J., Ducla-Soares, G. e Rocha, J. (2007), "Unveiling the structure of the Marrakech Medina: A shape grammar and an interpreter for generating urban form" in: *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, Nova York: Cambridge University Press, Volume 21, pp. 317-349.

El Croquis (2003), "Frank Gehry: 1996/2003", *El Croquis*, Madrid: El Croquis.

Fasoulaki, H. (2008), *Integrated Design: A Generative Multi-Performative Design Approach*, Disponível em: <http://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/43750/265806046.pdf?sequence=1> [24/03/2009].

Global Warming Potential (GWP), Disponível em: http://www.eia.doe.gov/glossary/glossary_g.htm [05/04/2009].

Jakimowicz, A., Barrallo, J. e Guedes, E. (1997) "Spatial Computer Abstraction: From Intuition to Genetic Algorithms" in: *CAAD Futures 1997*, Munique: Kluwer Academic Publishers, pp. 917-926.

Holland, J. (1992), *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, 1ª Edição, MIT Press.

Kilian, A. (2006), *Design Exploration through Bidirectional Modeling of Constraints*, Disponível em: <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/33803?show=full> [19/04/2009].

Kolarevic, B. (2000), "Digital Morphogenesis and Computational Architectures" in: *Constructing the Digital Space 4th SIGRADI Conference Proceedings*, Rio de Janeiro: PROURB, pp. 98-103.

Monks, M., Mok Oh, B. e Dorsey, J. (2000), "Audiioptimization: Goal-Based Acoustic Design", *IEEE Computer Graphics and Applications*, Volume 20, nº 3, pp. 76-91.

Shea, K. e Cagan, J. (1999), "The Design of Novel roof trusses with shape annealing: assessing the ability of a computational method in aiding structural designers with varying design intent" in: *Design Studies*, Volume 20, Elsevier, pp. 3-23

Shea, K., Aish, R. e Gourtovaia, M. (2003) "Towards Integrated Performance-Based Generative Design Tools" in: *Digital Design 21th eCAADe Conference Proceedings*, Graz: eCAADe, pp. 553-560

Shea, K., Sass, L. e Powell, M. (2005a) "Design production: constructing freeform designs with rapid prototyping" in: *The International Conference on Digital Design: The Quest for New Paradigms*, eCAADe, pp. 21-24

Shea, K., Aish, R. e Gourtovaia, M. (2005b) "Towards integrated performance-driven generative design tools" in: *Automation in Construction*, Volume 14, Elsevier, pp. 253-264

Stiny, G. e Gips, J. (1972) "Shape Grammars and the Generative Specification of painting and Sculpture" in: C.V. Freiman (ed.), *Information Processing*, Amsterdão, pp. 146-1465

Stiny, G. (1989) "What is a Design?" in: *New Ideas and Directions for the 1990's ACADIA Conference Proceedings*, ACADIA'89, pp. 137-146

O'Reilly, U-M., Hemberg, M., Menges, A., Jonas, K., Gonçalves, M. e Fuch, S. (2008), "Genr8: Architects' Experience with an Emergent Design Tool" in: *The Art of Artificial Evolution*, Springer Berlin Heidelberg, Part III, pp.167-188.

Anexos

Anexo I - Do processo generativo até à construção

As aplicações do EifForm que foram comentadas referem-se sobretudo a estágios iniciais de projecto. A própria autora reconhece a falta de detalhe que permite uma exequibilidade construtiva efectiva das formas estruturais geradas pelo algoritmo (Shea e Cagan, 1999: 23; Shea et al. 2005: 22). No objectivo de superar esta limitação Shea estuda a aplicação de métodos de Prototipagem Rápida (PR) ao algoritmo. A prototipagem aplicada não se baseia na modelação de um sólido único mas sim na decomposição do objecto tridimensional em diversos componentes produzidos de modo a simular o processo construtivo à escala. Os detalhes são definidos, atribuídos e adaptados à forma. A estrutura é decomposta em partes construtivas, que serão reproduzidas fisicamente, recorrendo à PR, para serem montadas num modelo à escala da estrutura.

Este método de PR é dos mais indicados para simular a pré-fabricação real dos elementos através de processos mais industrializados que se baseiam em métodos CNC (*Computer Numeric Control* – Controle Computorizado Numérico) que consistem na impressão, segundo técnicas de corte de vidro, metal, plástico ou outro material e na dobragem de peças metálicas.

A decomposição da estrutura em componentes individualizados leva a avaliar as relações entre as diferentes partes, as suas ligações e o tipo de pormenor que terá de ser aplicado desde do início do processo generativo. No estudo efectuado por Shea et al. (2005) as estruturas seriam encerradas por painéis de vidro, simulados na prototipagem rápida por peças de acrílico cortadas por uma máquina de corte por laser, os nós da estrutura seriam executados em metal através de métodos CNC, simulados na PR através de peças através o método FDM (*Fused Deposition Modeling*)¹. O nó estrutural foi concebido para fixar os painéis de acrílico pois pretendeu-se efectuar um modelo que não recorria a colas. O procedimento aplicado na PR dos diversos elementos da estrutura foi o seguinte:

1) Geração da estrutura no EifForm;

2) Aplicação dos nós – a cada nó estrutural, ponto gerado no EifForm foi associado um objecto paramétrico cujo objectivo é fixar o acrílico e unir os diversos membros estruturais. Estes objectos paramétricos foram concebidos à parte e adaptam-se à estrutura aquando da sua associação. A parametrização destes objectos foi efectuada por gramáticas de forma

¹ *Fused Deposition Modelling* – técnica aditiva de prototipagem rápida que consiste na deposição em camadas sucessivas de um polímero fundido. O filamento de plástico é fornecido a um molde de extrusão cuja extremidade é aquecida de maneira a derreter o material. O material termoplástico é depositado em camadas que endurecem logo de seguida após a sua extrusão. O molde de extrusão pode ser movido na horizontal e na vertical sendo controlado através de processos CNC (Computer Numeric Control) através de um software CAM (Computer Aided Manufacturing).

concebidas especialmente para tal. A associação do objecto paramétrico a cada nó estrutural processou-se da seguinte maneira:

- a) O elemento paramétrico nó, ou junção estrutural, é rotulado com um número e aplicado ao ponto de número correspondente gerado pelo EifForm;
- b) Aplicação e alinhamento de 1 membro estrutural entre 2 pontos;
- c) Nova junção é associada ao 2º ponto;
- d) Aplicação e alinhamento de 1 membro estrutural entre o 2 ponto e o 3º ponto;
- e) As junções são alinhadas na perpendicular em relação aos membros estruturais que ligam os pontos 1º ponto e o 2º;
- f) Um novo membro estrutural é aplicado entre o 1º ponto e o 3º completando assim a triangulação;
- g) Uma junção é aplicado ao 3º ponto e reorientado na perpendicular aos membros que ligam o 3º nó aos outros;
- h) Estes procedimentos, da alínea a) até à g) são repetidos até que todos os pontos, nós estruturais, gerados pelo EifForm estejam ligados (Figura I.I).

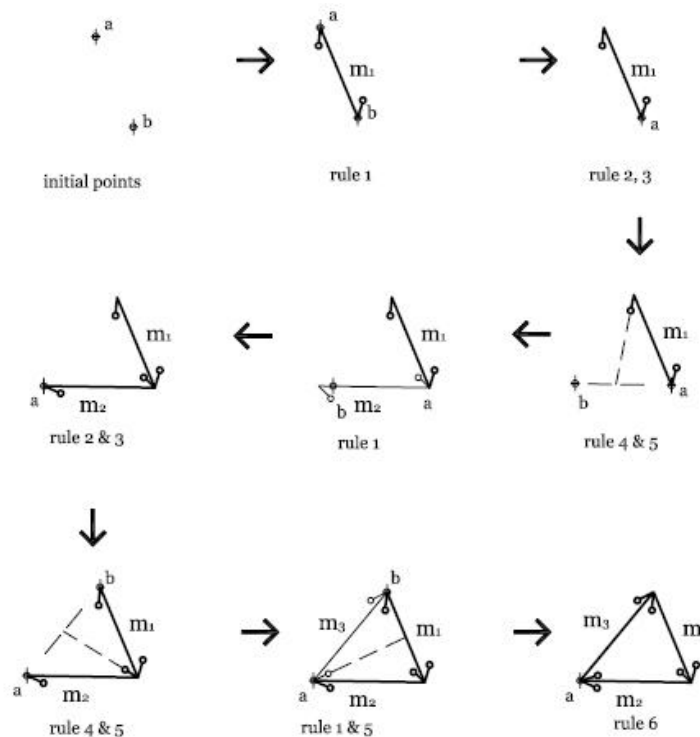


Figura I.I – Aplicação das regras da gramática de forma de modo a obter a triangulação e a associação dos objectos paramétricos aos pontos gerados pelo EifForm (Shea et al., 2005: 22).

3) Aplicação do vidro ou acrílico – painéis triangulares são associados a cada plano definido pela ligação de cada 3 junções estruturais. O plano triangular é um elemento paramétrico que se adapta a cada face da estrutura triangular gerada pelo EifForm (Figura I.II);

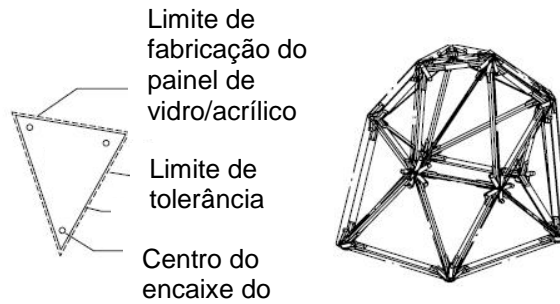


Figura I.II – Parâmetros do painel de vidro e instalação dos painéis numa estrutura totalmente montada (Shea et al., 2005: 23).

4) Rebatimento dos nós – após os nós, se terem associado e adaptado à estrutura, são copiados, separados dos painéis e rebatidos para a posição horizontal para a sua prototipagem ou fabricação em separado (Figura I.III);

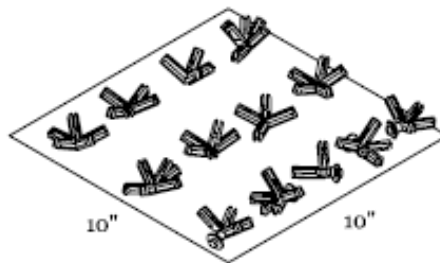


Figura I.III – Junções estruturais rebatidas no plano horizontal prontas para serem impressas na bandeja da impressora FDM. Fonte: Shea et al., 2005: 24.

5) Rebatimento dos painéis de vidro ou acrílico – cada superfície triangular é copiada e rebatida para o plano horizontal, garantido deste modo a sua verdadeira grandeza. Todos os planos são agrupados num polígono plano para se proceder à sua fabricação (Figura I.IV);



Figura I.IV – Rebatimento dos painéis de vidro ou acrílico. Fonte: Shea et al., 2005: 24.

Alguns modelos produzidos nas experiências de adaptação a processos de PR das estruturas geradas pelo EifForm podem ser observados na Figura I.V.



Figura I.V – Em cima à esquerda: unidade básica de montagem para cada plano triangular. Restantes: exemplos de modelos montados. Fonte: Shea et al., 2005.

Anexo II – Procedimento de Cálculo Energético para o consumo térmico e lumínico para o DOE 2.1 E

O DOE 2.1 E calcula o consumo energético dos espaços. Estabeleceu-se um procedimento tipo que permite definir os seguintes requisitos essenciais:

- 1) Definição da localização e do clima do sítio onde o modelo se implanta;
- 2) Descrição geométrica e construtiva dos espaços
- 3) Definição de sensores virtuais, colocados a uma altura específica, para determinação do nível de iluminação natural.
- 4) Definição de um sistema de luz artificial que regula automaticamente a sua intensidade ao longo do tempo. Ao longo do dia a luz artificial controlada por este sistema vai compensando a descida dos valores de luz natural para cumprir o critério de projecto, estabelecido pelo utilizador, para o nível de iluminância confortável;
- 5) Caracterização de um sistema de acondicionamento do ar que é accionado quando é necessário compensar a diferença entre temperatura interior e temperatura de conforto (definida pelo utilizador) através do aquecimento ou arrefecimento dos espaços;

Após ter definido as condições, o DOE 2.1 E calcula o consumo energético seguindo os seguintes passos (Caldas e Norford, 1999: 252):

Passo 1 – tendo em conta as estimativas calculadas para a quantidade de luz natural e a necessidade de utilização da luz artificial, o consumo total de energia necessário para sistemas de iluminação artificial é quantificado para todo o ano;

Passo 2 – considerando as características climáticas, fornecidas pelo ficheiro TMY, as disposições construtivas, os ganhos solares, ganhos por ocupação humana, ganhos por equipamento e iluminação artificial, etc. as temperaturas internas e externas são calculadas para cada espaço;

Passo 3 – comparação das temperaturas de conforto, definidas pelo utilizador, com as obtidas pela simulação, de modo a quantificar o consumo energético destinado para o aquecimento e arrefecimento dos diferentes espaços através de sistemas mecânicos de acondicionamento do ar.

Passo 4 – o DOE 2.1 E calcula o Consumo Energético Anual do edifício ao somar o consumo de energia anual destinado para o aquecimento/arrefecimento com o consumo energético anual da iluminação artificial. Para obter a Intensidade do Uso Energético divide-se o Consumo Energético Anual do Edifício pela superfície do edifício.

Anexo III – Optimização Pareto: Integração no Gene Arch e Aplicação Prática

Definição e Metodologia Operacional da Integração do Algoritmo Pareto no Gene_Arch (Tradução do Inglês pelo Autor, com base nas publicações Caldas 2002b, Caldas 2003 e Caldas 2005)

Caldas (2002b: 39) explica que a “(...) optimização Pareto faz uso de soluções dominadas e de soluções não dominadas”. A solução x domina a solução y se for pelo menos melhor em uma função objectiva e tão boa em todas as outras. Consideremos um problema de maximização de 3 soluções A, B e C cujo desempenho em dois critérios está definido no seguinte gráfico (Figura III.I):

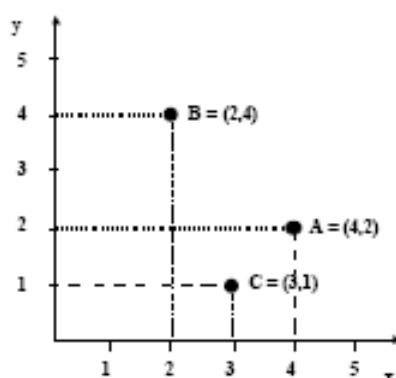


Figura III.I – Soluções Pareto Dominadas e Não Dominadas. Fonte: Caldas, 2002b: 2.

A optimização pareto excluiria todos os pontos do tipo C, visto que $C_x < A_x$, e que $C_y < A_y$ e $C_y < B_y$, e seleccionaria os pontos do tipo A e B que iriam formar a frente pareto visto que os pontos do tipo A possuem um desempenho melhor em x que B mas estes possuem um desempenho melhor em y . Como se pode observar as soluções apresentadas na frente pareto são diferentes o que leva a que após o AGP ter apresentado as suas configurações optimizadas o arquitecto terá de exercer um julgamento de preferência e optar.

A optimização Pareto converge numa família de indivíduos que são óptimos no sentido em que nenhum melhoramento pode ser obtido sem que nenhum outro aspecto de desempenho se degrade. O Algoritmo Pareto aplicado no Gene_Arch utiliza o método *ranking* (posicionamento) desenvolvido por Goldberg (*cit. in* Caldas, 2002b: 39). Este método atribui o *rank* (posição) = 1 aos indivíduos não dominados de toda a amostra de uma população. Estes indivíduos são retirados da população. Da população restante o algoritmo selecciona novamente as soluções não dominadas e atribui-lhes o *rank* = 2. Estes indivíduos são novamente isolados da população para se efectuar outra atribuição de *ranking*. O processo repete-se até que todos os indivíduos da população possuam um ranking. Para gerar uma nova população utilizam-se os habituais operadores genéticos que são aplicados tendo em conta o *ranking* das soluções. À nova população aplica-se o mesmo método. Todos estes passos são repetidos iterativamente até se atingir o número de gerações definido pelo utilizador.

Contudo verificou-se que o método de ranking tem a tendência para agrupar as soluções à volta de pequenas áreas da frente pareto. Este fenómeno é denominado de *genetic drift* (Caldas, 2002b: 39) e ocorre devido a erros estocásticos no processo de selecção. Devido a este fenómeno este método não garante que o conjunto Pareto seja uniformemente distribuído no espaço de solução do problema. Para solucionar este problema Caldas (2002b) aplica estratégias que visam alargar a diversidade das soluções das frentes pareto através da “(...) incorporação de *niching techniques* (técnicas de indução de nicho) ao método *ranking* de Goldberg, através de um processo de incorporação denominado de *Nondominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA)*” (Caldas 2002b: 39). A agregação de tais técnicas exerce uma pressão de propagação das populações geradas levando a que a população final se torne mais diversificada ao explorar diferentes nichos de solução ao longo da frente pareto. Implementou-se as *niching techniques* através de um processo conhecido como *share* - partilha - (Caldas, 2002b: 40) que funciona da seguinte maneira:

1) Às soluções, a que o AGP (Algoritmo Genético do tipo Pareto) atribui o *rank* = 1, são dadas um valor de aptidão inicial = F_1 (Caldas, 2002b: 40);

2) O número de soluções que pertencem ao nicho da solução, n , é calculado. Determina-se o nicho da solução como os indivíduos que estão a uma distância pré-determinada da solução, agrupando assim indivíduos de desempenho similar;

3) “(...)A aptidão partilhada de cada indivíduo do nicho da solução, F_{shared} , é calculada dividindo a aptidão inicial, F_1 , pelo número de indivíduos que compõem o nicho, n ; $F_{shared} = F_1/n$.” (Caldas, 2002b: 40)

4) “(...) Às soluções que foram atribuídas *rank* = 2 aplica-se um valor de aptidão F_2 que será inferior ao valor de aptidão partilhada, F_{shared} , das soluções *rank* = 1; $F_2 < F_{shared} \cdot 1$.” (Caldas, 2002b: 40)

5) Aplicam os pontos 2 e 3 para calcular o número de soluções que compõem o nicho das soluções *rank*=2 e o seu valor de aptidão partilhada;

6) “(...)Este processo aplica-se a todos os indivíduos da população até que todos possuam um valor de aptidão partilhada.” (Caldas, 2002b: 40);

7) Após todos os elementos da população terem um valor determinado para F_{shared} , Caldas (2002b: 40) expõe que “(...) os operadores genéticos são utilizados para gerar a próxima população.”;

8) Todos os passos anteriores são aplicados às novas populações e só termina quando o número de gerações definido pelo utilizador é atingido.

Apesar de possuir uma implementação computacional complexa, as *niching techniques* incrementadas ao AGP asseguram a diversidade de soluções de desempenho similar, o que providencia ao arquitecto um maior número de estratégias para solucionar o problema em estudo (Caldas 2002b: 3).

Aplicação Prática do Algoritmo Genético Pareto no Gene_Arch – Edifício de Escritórios, Chicago, EUA

A aplicação prática do AGP por parte do Gene_Arch é testada por Caldas (2005) num pequeno edifício de escritórios que se situaria no clima frio da cidade de Chicago, EUA, imaginado pela autora. O edifício, também explorado em anteriores artigos (Caldas, 2002a; Caldas e Norford, 2003), possui 2 pisos. Cada piso encerra 4 salas fixas de modo a que todas as adjacências sejam conhecidas (Figura III.II). Os parâmetros variáveis estão identificados na Figura III.II e são: o comprimento e a largura de cada sala; a altura das salas do segundo piso; a inclinação das coberturas das salas do segundo piso, que podem variar entre os 0 e os 45°.

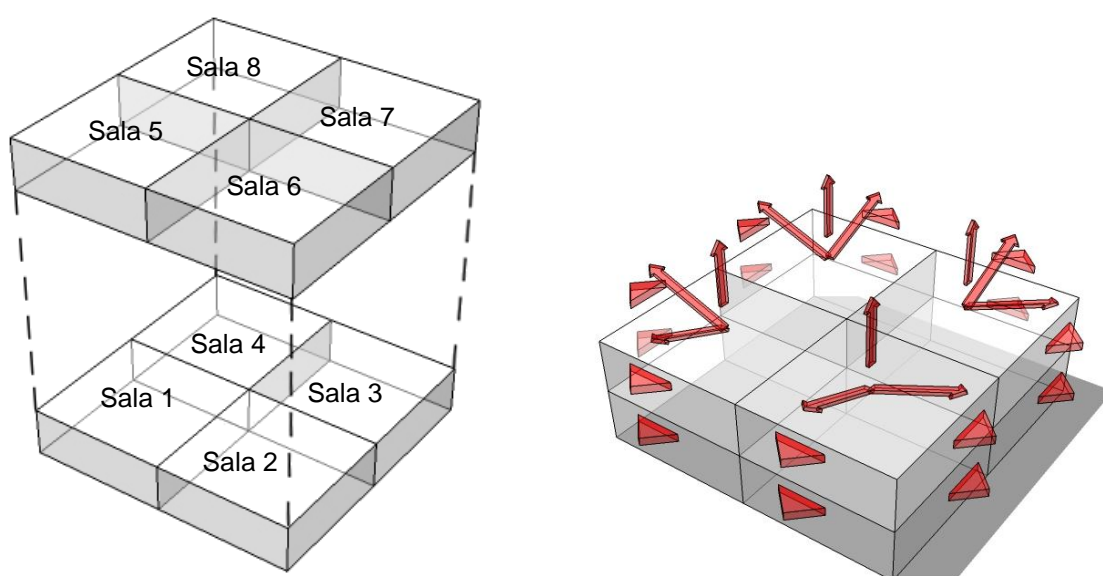


Figura III.II – O padrão básico do edifício de escritórios (à esquerda) e os seus parâmetros variáveis (à direita).

De modo a simplificar o processo evolutivo formal, Caldas (2002a) definiu as seguintes regras e restrições:

Regra 1 – A altura do 1º piso é um valor fixo.

Regra 2 – As janelas só são permitidas nas paredes exteriores definidas no Padrão Básico. Se o processo generativo vier a propor novas paredes exteriores essas não possuirão janelas.

Regra 3 – O comprimento das janelas é sempre igual ao comprimento das paredes. Esta regra foi concebida porque os Algoritmos Genéticos aplicados ainda não permitem a alteração dinâmica, durante o processo generativo, dos intervalos de variáveis independentes, ou seja a discretização das variáveis independentes não podem depender do valor de outras variáveis.

Regra 4 – Às coberturas inclinadas só foi permitido um sentido, crescente de fora para dentro (Figura III.III).

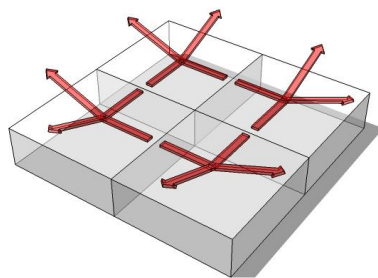


Figura III.III – Indicação dos sentidos permitidos às águas da cobertura.

Regra 5 – Quando o ângulo da cobertura é diferente de 0° é automaticamente gerado um clerestório (Figura III.IV). A altura do clerestório é dada pela diferença de alturas originada pela inclinação da cobertura. Para definir o comprimento dos clerestórios, aplicou-se a regra 3.

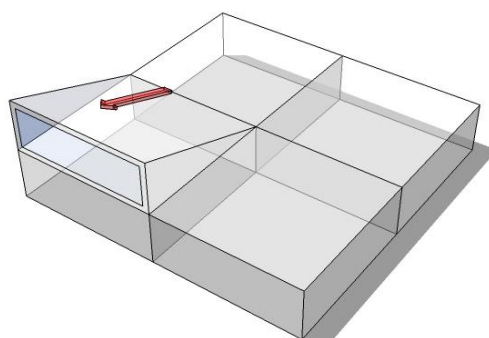


Figura III.IV – Clerestório gerado automaticamente pela existência de uma cobertura inclinada.

O problema multi-critério que o AGP pretende resolver é a maximização do uso da luz solar e a minimização dos consumos energéticos destinados ao aquecimento dos espaços. O conflito patente no problema multi-critério é o seguinte: considerando o clima frio de Chicago observa-se que à medida que as superfícies envidraçadas aumentam e/ou os espaços se estreitam existe uma maximização do uso da luz natural e conseqüentemente a uma redução do uso da iluminação artificial mas também um aumento das perdas térmicas, logo a um maior gasto de energia no aquecimento do espaço. Por outro lado a minimização dos consumos energéticos destinados ao aquecimento leva à redução dos panos envidraçados e/ou à compactação da forma o que provoca por outro lado um aumento de energia utilizada pela iluminação artificial.

Como as dimensões do edifício são variáveis a fronteira das soluções Pareto é definida por edifícios maiores e compactos (piores colectores solares mas menos susceptíveis a perdas térmicas dependendo por isso o mínimo de energia para aquecimento) e edifícios menores e estreitos (melhores colectores solares mas com um pior desempenho térmico). Para se poder comparar o desempenho energético de soluções de dimensões e escalas tão díspares aplicou-se a função objectiva Intensidade do Uso Energético (KWh/unidade de área) (Caldas, 2005: 650).

As estratégias adoptadas pelo SGP na optimização do consumo energético para aquecimento baseiam-se na redução do piso superior em relação ao piso inferior, pois estes são mais susceptíveis a perdas térmicas devido à dissipação do ar quente na cobertura. No que concerne à optimização do uso da luz solar o SGP gera um piso superior maior porque este não é obscurecido por elementos construtivos (Caldas, 2005: 650). A frente de soluções Pareto pode ser observada na Figura III.V e no Quadro III.I. A frente Pareto é enquadrada pela solução 1, que possui o melhor comportamento térmico mas a pior performance lumínica, e pela solução 7, que possui o pior desempenho térmico mas o melhor desempenho lumínico.

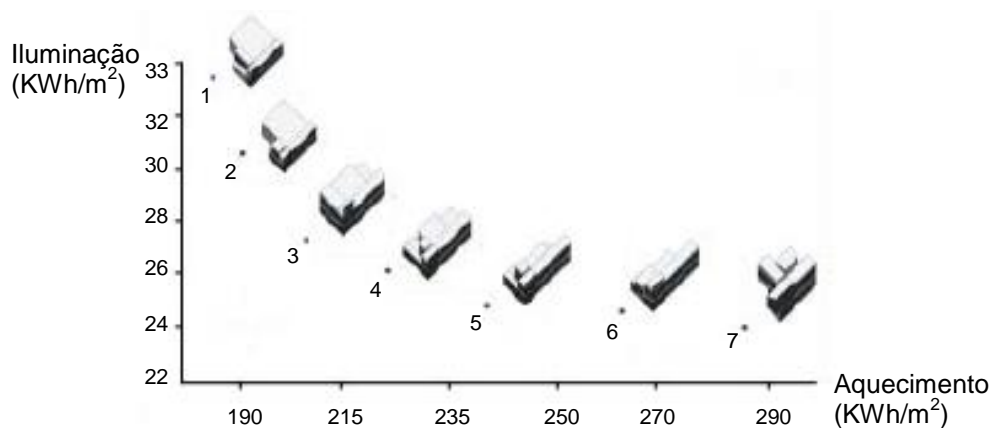


Figura III.V – Soluções da frente Pareto e o seu desempenho energético para aquecimento e iluminação. Fonte: Caldas, 2005: 650.

Solução	Aquecimento (Kwh/m ²)	Iluminação (Kwh/m ²)	Piso 1 Área (m ²)	Piso 2 Área (m ²)	Área Total (m ²)
1	185	33	332	283	605
2	190	30	334	281	595
3	202	27	220	177	397
4	218	26	194	120	314
5	237	25	144	92	236
6	262	24	112	102	214
7	286	23	70	77	147

Quadro III.I – Soluções da frente Pareto, respectivas áreas e consumos energéticos para aquecimento e iluminação. Fonte: Caldas, 2005: 650.

A solução 1 apresenta uma volumetria compacta com espaços grandes virados a Nordeste e outros mais estreitos, totalmente abertos, virados a Sul que funcionam como estufas solares (Figura III.VI). As suas salas maiores, a 3 e a 7, são as duas salas com pior desempenho lumínico. A sala 3 apesar das suas grandes dimensões não apresenta o maior gasto energético para o aquecimento devido à sua forma compacta e por não possuir uma cobertura exposta. Por seu lado, a cobertura exposta da sala 7 leva a que o seu desempenho

térmico se degrade. Para contrariar as perdas térmicas através da cobertura o Gene_Arch diminuiu a altura da janela da sala 7, o que levou a uma redução significativa dos gastos energéticos para o aquecimento. A sala 4 possui baixos valores de consumo de luz artificial e de aquecimento sendo a sala de melhor desempenho. Os restantes espaços possuem um balanço equilibrado entre poupança da energia destinada para a iluminação artificial e para o aquecimento do espaço (Caldas, 2005: 651-652).

Por seu lado, na solução 7 o SGP propôs espaços mais estreitos onde o consumo energético destinado à utilização da iluminação artificial é muito reduzido (Figura III.VII). A opção de espaços mais estreitos e longilíneos é contrabalançada pela diminuição da altura das janelas com a intenção de reduzir ao máximo as perdas térmicas. Esta estratégia é legitimada pelo contraditório observado na sala maior e mais compacta da solução 7, a sala 3, que possui uma janela que vai desde o pavimento ao tecto disponibilizando o maior fluxo de luz natural possível. Apesar de ser a solução que mais poupa na iluminação esta poupança não é suficiente para contrabalançar as necessidades de aquecimento que uma forma desta natureza requer no clima frio de Chicago, EUA. Ao termos em conta a Intensidade do Uso Energético a solução 7 apresenta um pior *trade-off* que a solução 1 (Caldas, 2005).

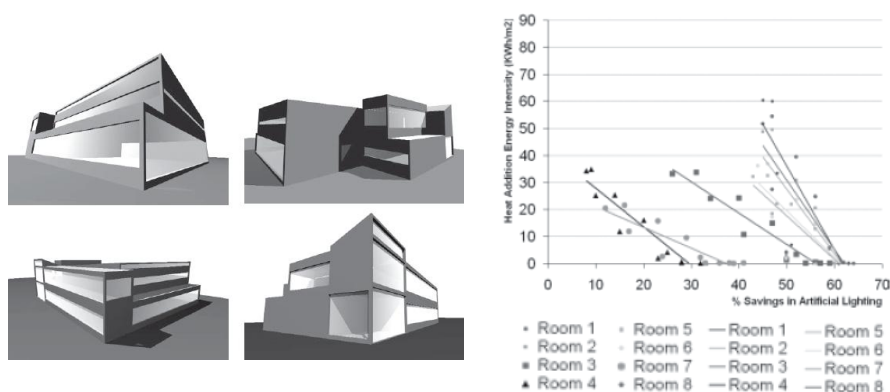


Figura III.VI – Vistas da Solução 1 e Gráfico de Intensidade da Adição de Energia para Aquecimento (Kwh/m²) versus Poupanças em Iluminação Artificial (%) para cada sala em cada Mês. Fonte: Caldas, L. 2005: 650.

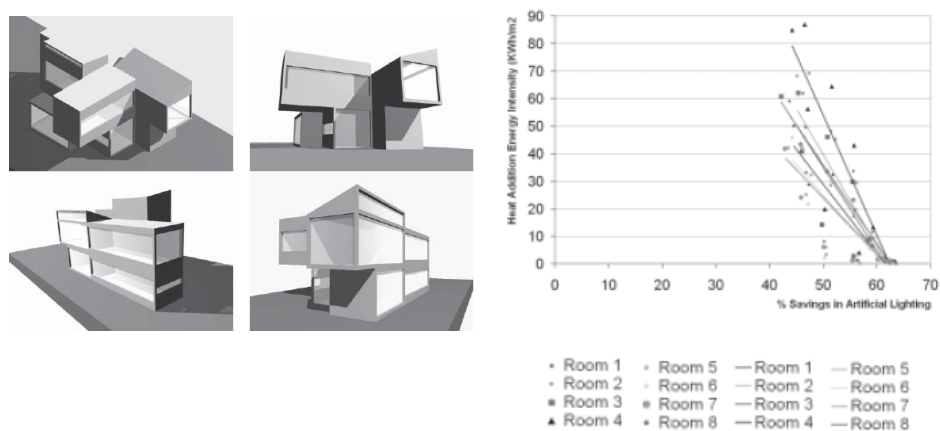

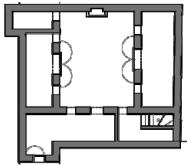
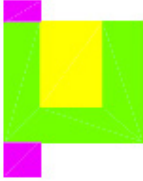
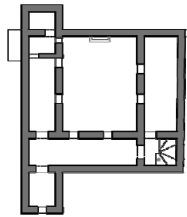
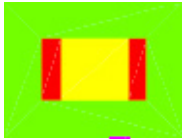
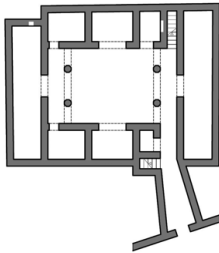
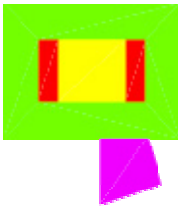
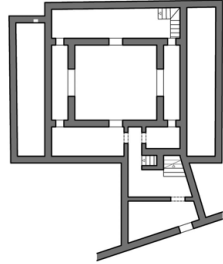





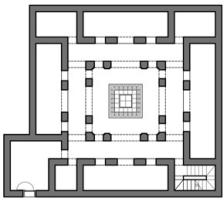
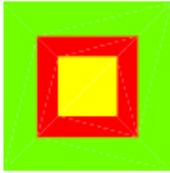
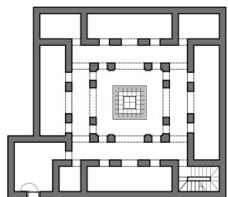
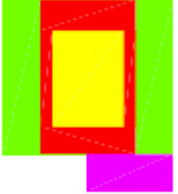


Figura III.VII – Vistas da Solução 7 e Gráfico de Intensidade da Adição de Energia para Aquecimento (Kwh/m²) VS Poupanças em Iluminação Artificial (%) para cada sala em cada mês. Fonte: Caldas, 2005: 650.

Anexo IV – Tradução das Casas do *Corpus* a partir da Gramática de Forma

Esquemas da Gramática de Forma para cada Casa do <i>Corpus</i>				
	Piso 0 Gramática de Forma	Piso 0 <i>Corpus</i>	Piso 1 Gramática de Forma	Piso 1 <i>Corpus</i>
Dar 27				
Dar 33	 <small>Dar 33</small>			
Dar 73				
Dar Charifa				

<p>Dar Dounia</p>				
<p>Dar Foundouk</p>				
<p>Dar Frances</p>				
<p>Dar Hannah</p>				

Quadro IV – As oito casas do *Corpus* traduzidas em termos da Gramática de Forma elaborada para cada um dos pisos. Fonte: Imagens inseridas elaboradas no âmbito do projecto POCTI/AUR/42147/2001.

Anexo V – Tabelas e Quadros Analíticos do Corpus

Para melhor compreensão das Tabelas e Quadros Analíticos resultantes da análise do Corpus arquitectónico da Casa Pátio da Medina de Marrakech os esquemas apresentados nas figuras seguintes são essenciais.

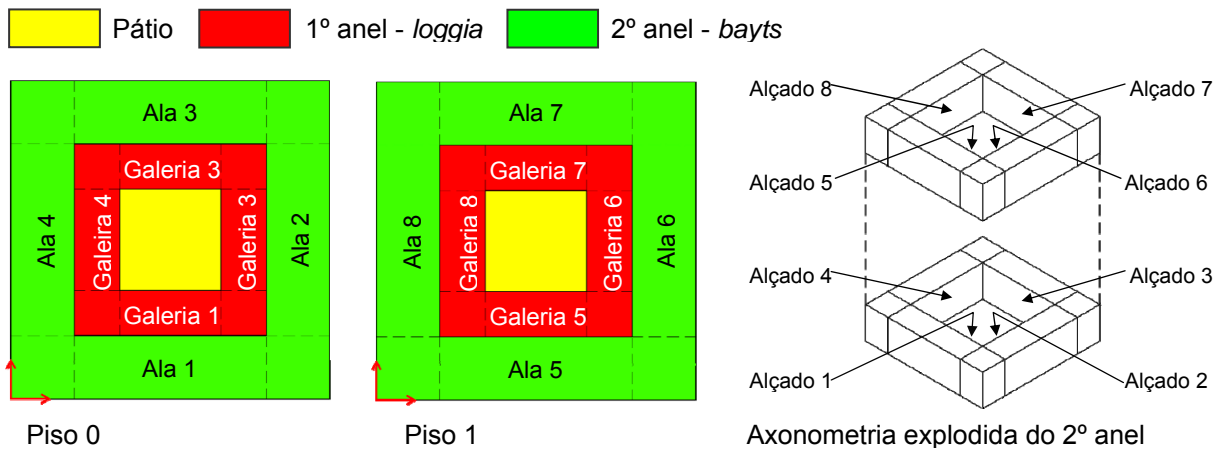


Figura V.I – Identificação dos anéis estudados, nomenclatura das alas, galerias e alçados considerados.

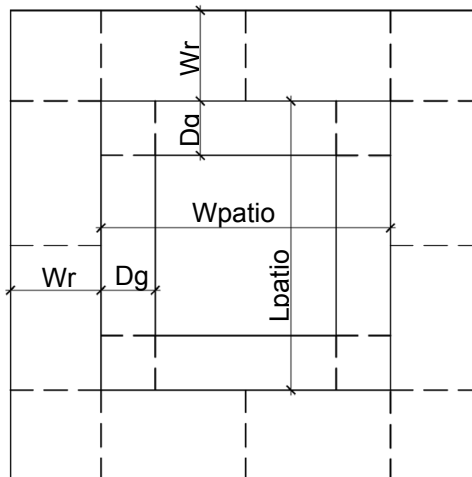


Figura V.II – Dimensões gerais consideradas para o Pátio, 1º Anel e 2º Anel.

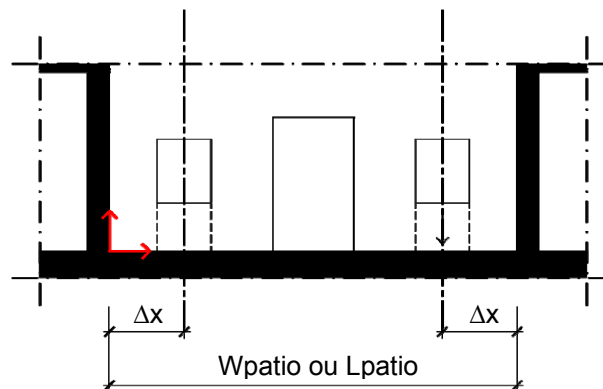


Figura V.III – Eixo das janelas laterais e dimensões consideradas para o seu posicionamento em Alcados do Tipo II e III (Tabela X).

Dimensões do Pátio			
Casas Pátio	<i>Wpatio</i> (m)	<i>Lpatio</i> (m)	<i>Rpatio</i> (<i>Lpatio</i>/<i>Wpatio</i>)
DAR 27	5,50	7,00	1,27
DAR 33	5,50	9,40	1,70
DAR 73	3,60	4,10	1,14
DAR CHARIFA	9,03	9,03	1,00
DAR DOUNIA	10,71	8,04	0,75
DAR FRANCES	7,80	8,00	1,03
DAR HANNAH	6,87	6,01	0,88
FOUNDOUK	6,60	6,60	1,00

Tabela V.I – Dimensões do Pátio.

Larguras e Profundidades dos Anéis das Casas Pátio			
Casas Pátio	Dg (m)	Wr min. (m)	Wr max. (m)
DAR 27	-	3,00	3,50
DAR 33	1,70	3,00	3,25
DAR 73	1,10	2,10	2,30
DAR CHARIFA	1,90	3,00	3,00
DAR DOUNIA	1,41	3,67	4,07
DAR FRANCES	1,00	2,80	3,40
DAR HANNAH	1,00	3,00	3,93
FOUNDOUK	1,50	2,80	2,80

Tabela V.II – Larguras dos anéis das Casas Pátio. Dg – Profundidade do 1º anel; Wr min. – Largura mínima do 2º Anel, Wr Max. – Largura máxima do 2º anel.

Width das Janelas Laterais (<i>Wwin1</i>)				
Casa Pátio	Alçado 1 e 3	Alçado 4 e 2	Alçado 5 e 7	Alçado 8 e 6
Dar 27	0,70 m	0,70 m	0,70 m	0,70 m
Dar 33	∅	0,70 m	0,70 m	1,20 m
Dar 73	0,70 m	0,50 m	∅	0,50 m
Dar Charifa	0,70 m 0,80 m	0,80 m	∅	∅
Dar Dounia	0,80 m	0,92 m	1,00 m 0,70 m	0,80 m
Dar Frances	0,80 m	0,70 m	0,80 m	0,90 m
Dar Hannah	1,19 m 1,00 m	1,05 m 1,15 m	1,00 m	1,00 m
Dar Foundouk	0,90 m	0,90 m	0,90 m 1,12 m	1,90 m 0,90 m

Tabela V.III – Width das Janelas Laterais (*Wwin1*).

Width das Janelas Centrais (Wwin2)				
Casa Pátio	Alçado 1 e 3	Alçado 4 e 2	Alçado 5 e 7	Alçado 8 e 6
Dar 27	1,00 m	1,50 m	∅	∅
Dar 33	1,55 m	2,00 m	1,60 m	2,00 m
Dar 73	1,10 m	1,00 m	∅	1,00 m
Dar Charifa	1,30 m	1,72 m	0,70 m	0,77 m
Dar Dounia	1,30 m	1,55 m	0,94 m	1,374 m
Dar Frances	1,50 m	3,00 m	1,50 m	3,00 m
Dar Hannah	1,25 m 1,70 m	2,33 m 1,30 m	1,00 m	∅
Dar Foundouk	1,50 m	1,50 m	2,77 m	2,00 m 1,50 m

Tabela V.IV – Width das Janelas Centrais (Wwin2).

Height das Janelas Laterais (Hwin1)				
Casa Pátio	Alçado 1 e 3	Alçado 4 e 2	Alçado 5 e 7	Alçado 8 e 6
Dar 27	∅	1,80 m	∅	1,80 m
Dar 33	∅	2,65 m	2,00 m	2,50 m
Dar 73	1,75 m	1,75 m	∅	1,50 m
Dar Charifa	2,18 m	3,10 m	∅	∅
Dar Dounia	2,43 m	2,87 m	1,15 m	2,25 m
Dar Frances	1,85 m	1,85 m	2,00 m	2,03 m
Dar Hannah	2,20 m	2,30 m	1,64 m	1,64 m
Dar Foundouk	2,00 m	2,00 m	2,00 m	2,00 m

Tabela V.V – Height das Janelas Laterais (Hwin1).

Height das Janelas Centrais (Hwin2)				
Casa Pátio	Alçado 1 e 3	Alçado 4 e 2	Alçado 5 e 7	Alçado 8 e 6
Dar 27	∅	2,75 m	∅	1,80 m
Dar 33	3,75 m	2,60 m	2,50 m	2,775 m
Dar 73	2,20 m	2,20 m	∅	2,30 m
Dar Charifa	2,82 m	2,95 m	1,10 m	0,90 m
Dar Dounia	2,43 m	3,13 m	1,70 m	2,50 m
Dar Frances	2,85 m	2,85 m	2,20 m	2,50 m
Dar Hannah	2,75 m	2,50 m	1,64 m	1,64 m
Dar Foundouk	2,00 m	2,00 m	2,50 m	2,00 m

Tabela V.VI – Height das Janelas Centrais (Hwin2).

Casa Pátio	Distância máxima do Pavimento ao Peitoril das Janelas Laterais (Ywin max)
Dar 27	0,80 m
Dar 33	0,65 m
Dar 73	0,70 m
Dar Charifa	0,75 m
Dar Dounia	0,475 m
Dar Frances	0,35 m
Dar Hannah	0,41 m
Dar Foundouk	0,41 m

Tabela V.VII – Distância máxima do Pavimento ao Peitoril das Janelas Laterais (Ywin max).

Posição do Eixo das Janelas Laterais em Alçados do Tipo II e III em Relação às Dimensões do Pátio				
Casas Pátio	Distância até ao Eixo (Δx) (m)	Dimensão do Pátio a Considerar (W_{patio} ou L_{patio}) (m)	Rácio ($\Delta x/W_{patio}$ ou L_{patio})	Posição do Eixo em relação à dimensão do Pátio (% da dimensão do Pátio)
DAR 27	1,375	7,00	0,196	20
DAR 33	0,675	5,50	0,123	12
DAR 73	-	-	-	-
DAR CHARIFA	2,48	9,04	0,27	27
DAR DOUNIA	1,37	8,04	0,17	17
DAR FRANCES	1,50	8,00	0,19	19
DAR HANNAH	-	-	-	-
FOUNDOUK	-	-	-	-
Média da Posição do Eixo em Relação ao Pátio (%)	19			

Tabela V.VIII – Posicionamento do eixo das janelas laterais em Alçados do Tipo II e III relativamente às dimensões do Pátio.

Casa Pátio	Espessuras de Paredes
Dar 27	0,50 m
Dar 33	0,50 m
Dar 73	0,30 m
Dar Charifa	0,50 m
Dar Dounia	0,50 m
Dar Frances	0,40 m
Dar Hannah	0,35 m
Dar Foundouk	0,40 m
Média da espessura das paredes das Casas Pátio	0,43 m

Tabela V.IX – Espessuras de Paredes e respectiva média.

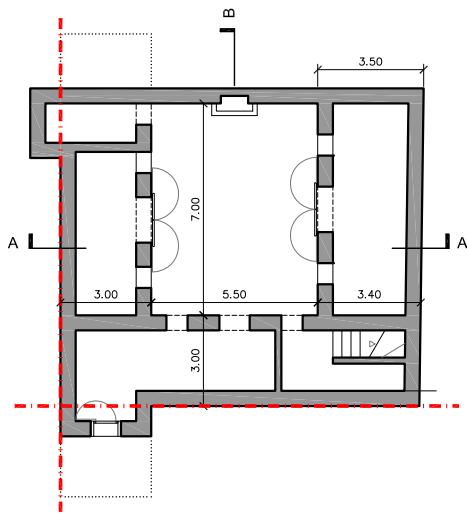
Altura dos Pisos				
Casas Pátio	Piso 0 min. (m)	Piso 0 max. (m)	Piso 1 min. (m)	Piso 1 max. (m)
DAR 27	-	3,44	-	3,46
DAR 33	3,10	5,90	-	3,75
DAR 73	-	2,90	-	3,40
DAR CHARIFA	3,85	4,29	2,55	4,26
DAR DOUNIA	-	4,05	-	3,45
DAR FRANCES	-	3,73	-	3,53
DAR HANNAH	3,50	4,15	3,25	5,10
FOUNDOUK	-	3,58	-	3,28
Média Piso 0	3,86 m			
Média Piso 1	3,59 m			
Média Total	3,73 m			

Tabela V.X – Altura dos Pisos (do pavimento a eixo da laje). Foi contemplada uma dimensão mínima e outra máxima devido às situações onde os pisos possuem cotas de soleira diferentes. Quando o piso não possui diferentes níveis o valor para a altura do piso foi considerado como o valor máximo.

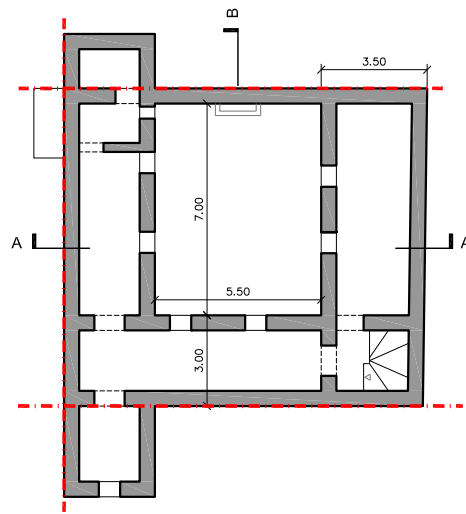
QUADRO ANALÍTICO V.I - DAR 27

LEVANTAMENTO

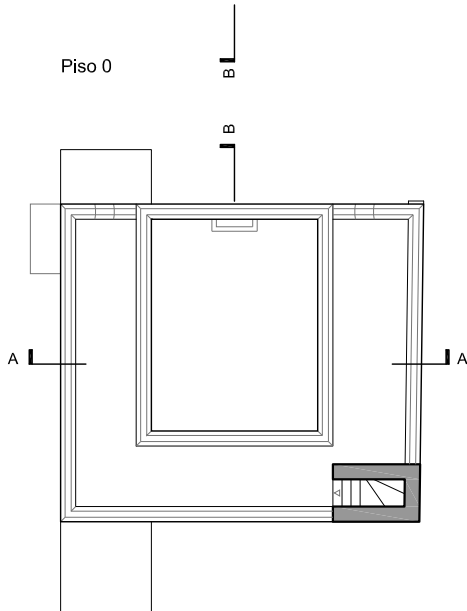
escala 1:250



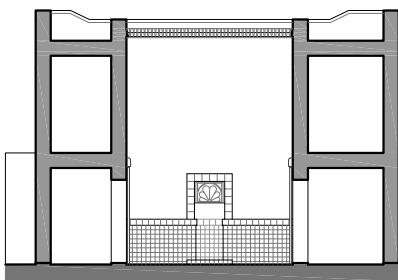
Piso 0



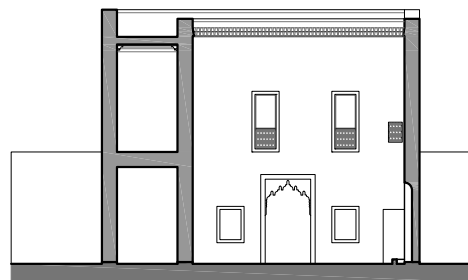
Piso 1



Cobertura



Corte A



Corte B

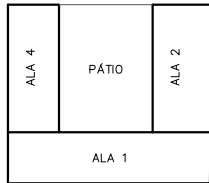
--- Limite do 2º Anel

QUADRO ANALÍTICO V.I - DAR 27 (cont.)

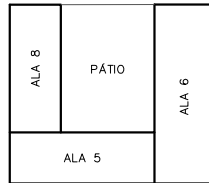
ANÁLISE VOLUMÉTRICA

Alas e Galerias

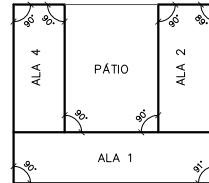
Ângulos das Alas



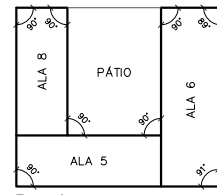
Piso 0



Piso 1



Piso 0



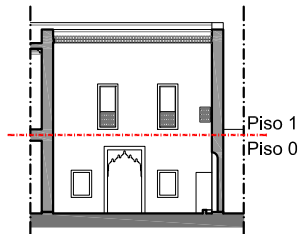
Piso 1

ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO DOS ALÇADOS DO PÁTIO

Composição dos Alçados do Pátio

Nivelamento dos Alçados

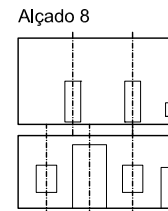
Correspondência entre vãos de pisos diferentes



Corte B

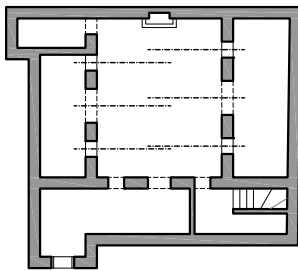


Alçado 4

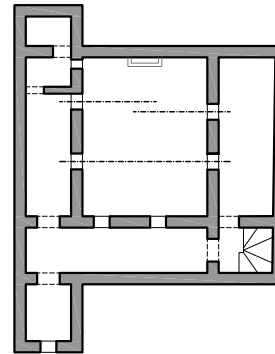


Alçado 4

Correspondência entre os Alçados do Pátio

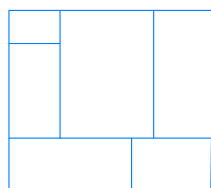


Piso 0

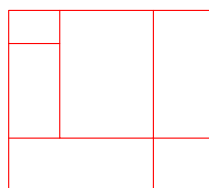


Piso 1

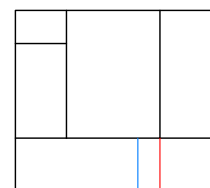
ANÁLISE DA CONFIGURAÇÃO PLANIMÉTRICA



Compartimentação do Piso 0



Compartimentação do Piso 1



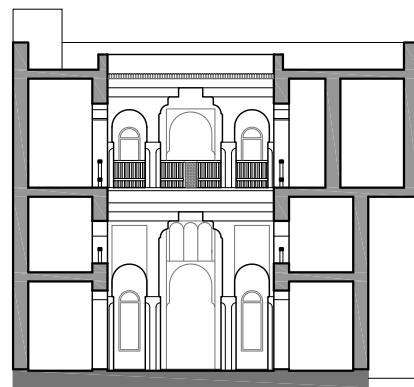
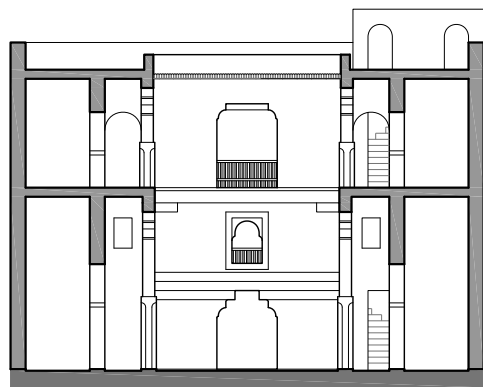
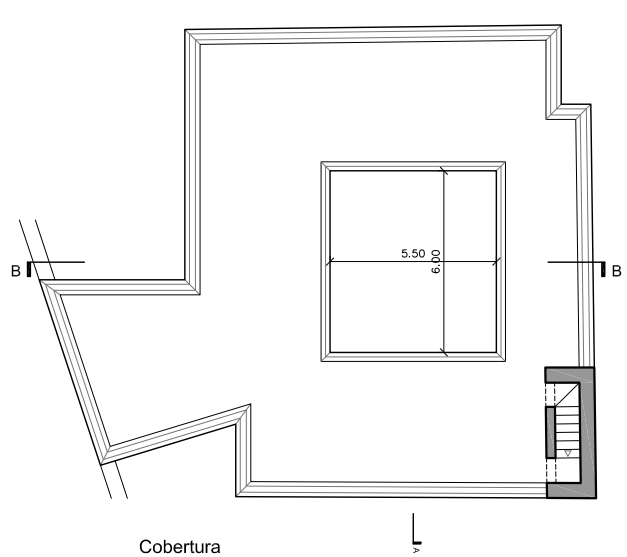
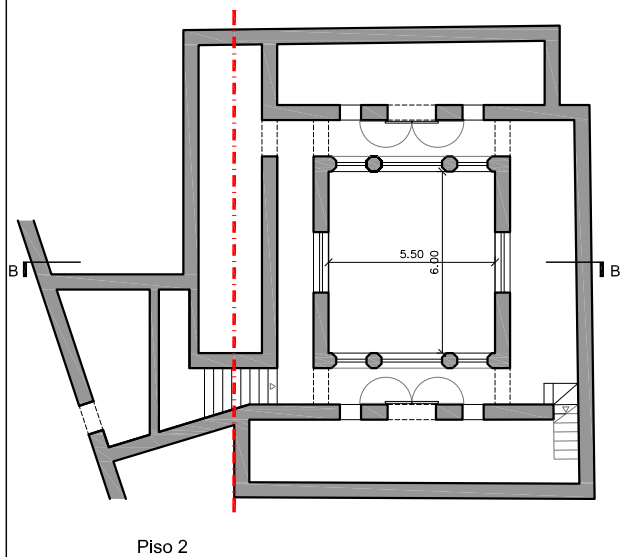
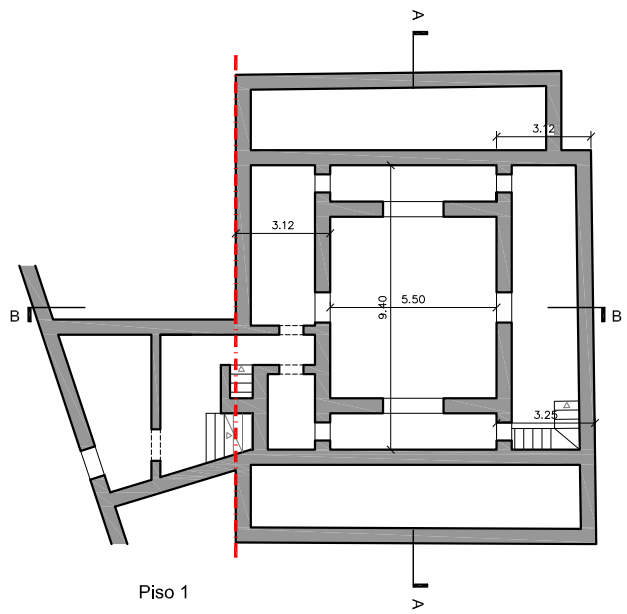
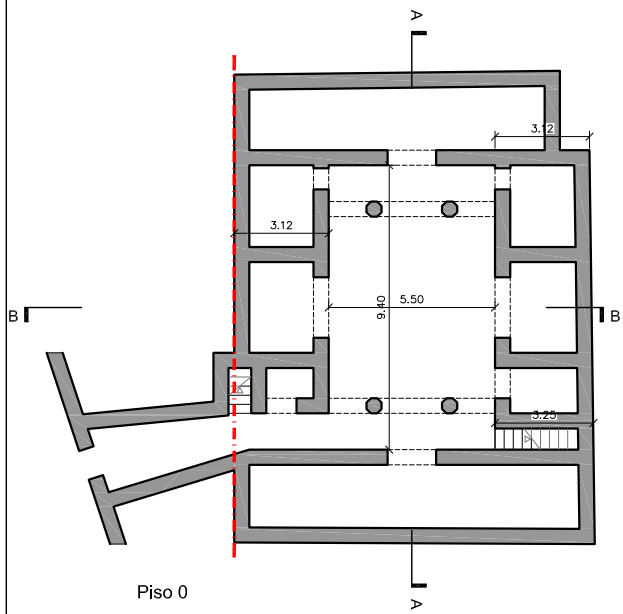
Sobreposição da Compartimentação do Piso 1

— Piso 0 — Piso 1 — Piso 2 — Sobreposição de compartimentações

QUADRO ANALÍTICO V.II - DAR 33

LEVANTAMENTO

escala 1:250

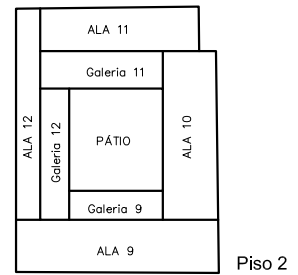
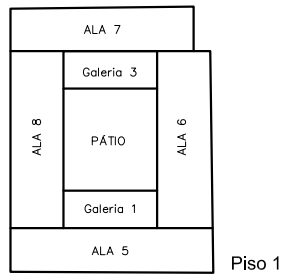
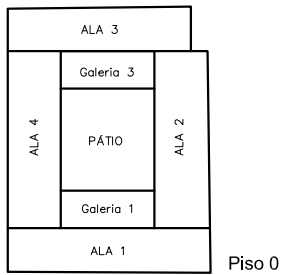


--- Limite do 2º Anel

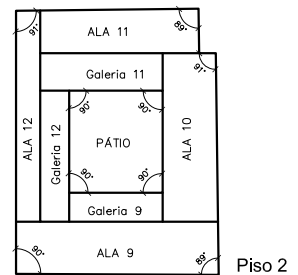
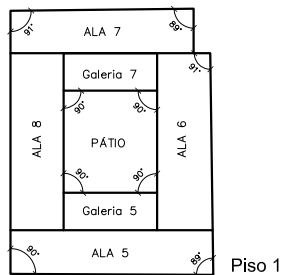
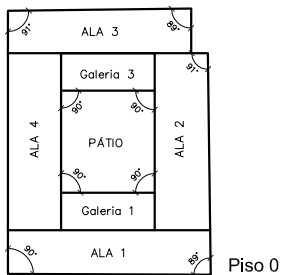
QUADRO ANALÍTICO V.II - DAR 33 (cont.)

ANÁLISE VOLUMÉTRICA

Alas e Galerias



Ângulos das Alas

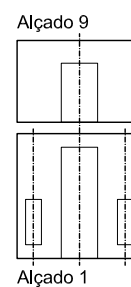
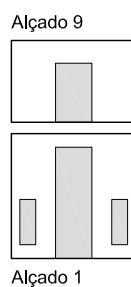
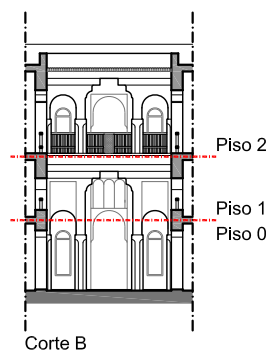
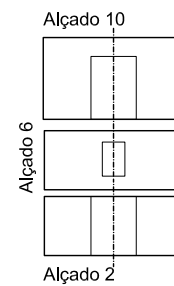
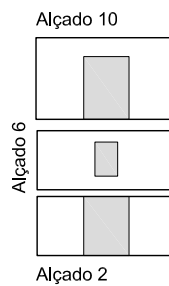
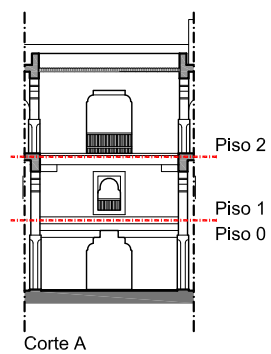


ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO DOS ALÇADOS DO PÁTIO

Composição dos Alçados do Pátio

Nivelamento dos Alçados

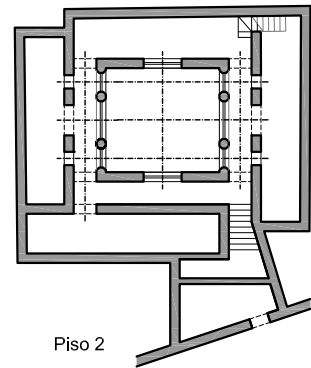
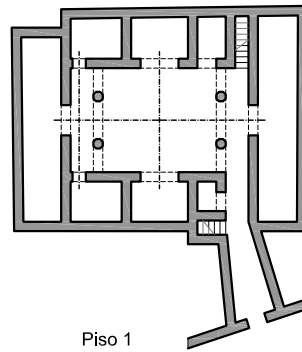
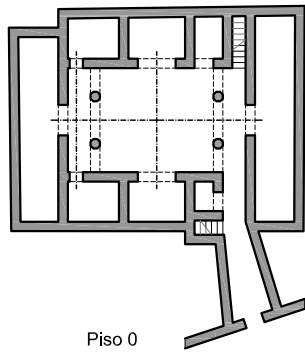
Correspondência entre vãos de pisos diferentes



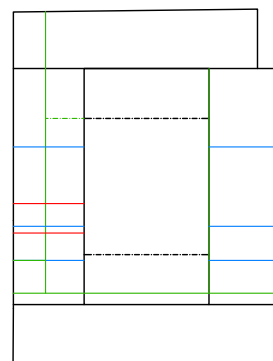
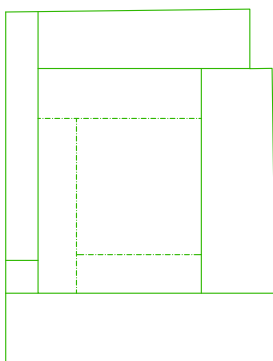
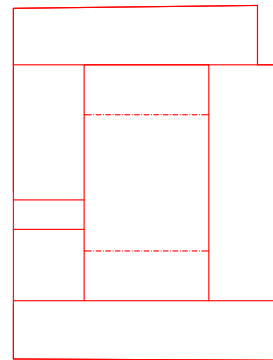
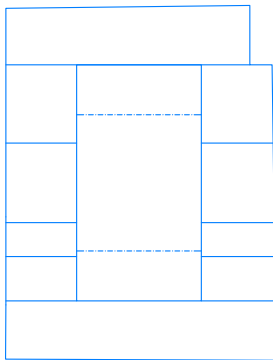
QUADRO ANALÍTICO V.II - DAR 33 (cont.)

ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO DOS ALÇADOS DO PÁTIO

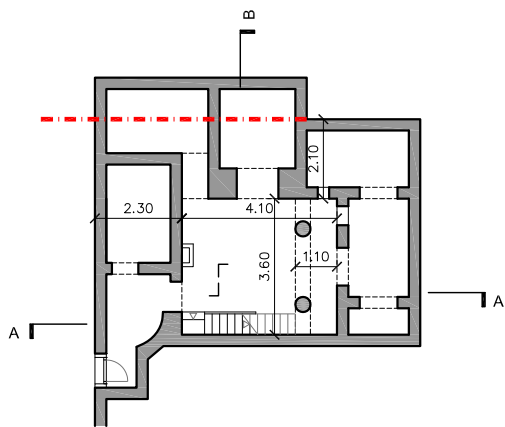
Correspondência entre os Alçados do Pátio



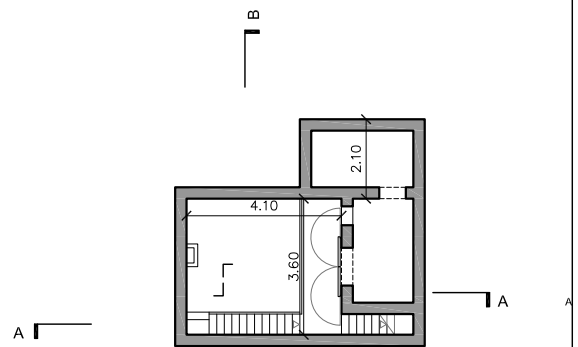
ANÁLISE DA CONFIGURAÇÃO PLANIMÉTRICA



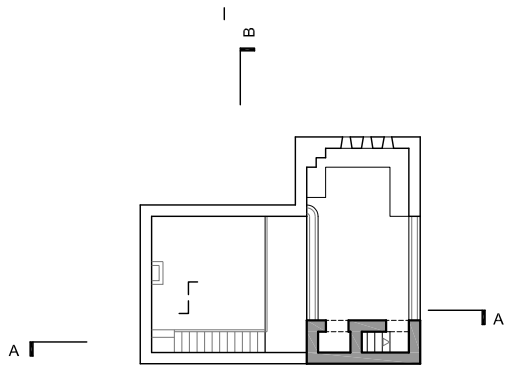
— Piso 0 — Piso 1 — Piso 2 — Sobreposição de compartimentações



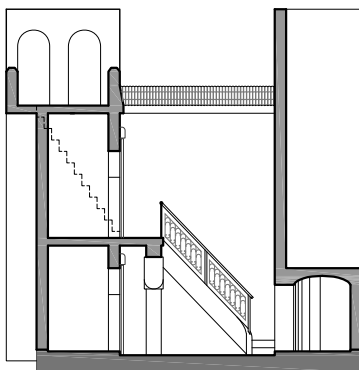
Piso 0



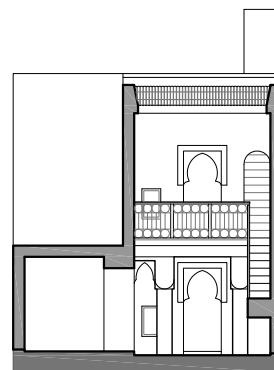
Piso 1



Cobertura



Corte A



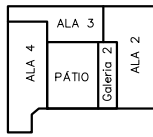
Corte B

QUADRO ANALÍTICO V.III - DAR 73 (cont.)

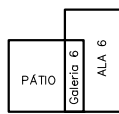
ANÁLISE VOLUMÉTRICA

Alas e Galerias

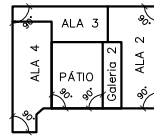
Ângulos das Alas



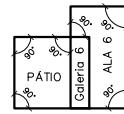
Piso 0



Piso 1



Piso 0



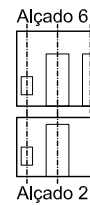
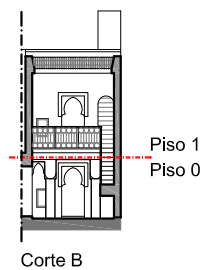
Piso 1

ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO DOS ALÇADOS DO PÁTIO

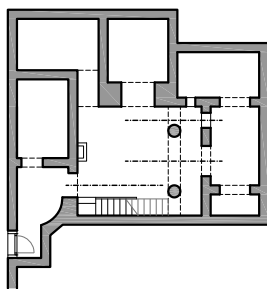
Composição dos Alçados do Pátio

Nivelamento dos Alçados

Correspondência entre vãos de pisos diferentes



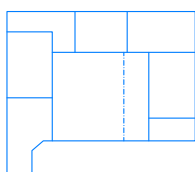
Correspondência entre os Alçados do Pátio



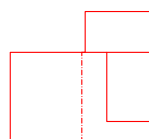
Piso 0

Nota: Só existe correspondência entre alçados quando ambos pertencem a alas. Neste caso não existem mais correspondências uma vez que os restantes alçados confrontam muros.

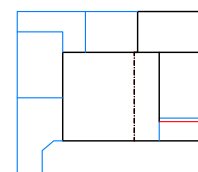
ANÁLISE DA CONFIGURAÇÃO PLANIMÉTRICA



Compartimentação do Piso 0



Compartimentação do Piso 1



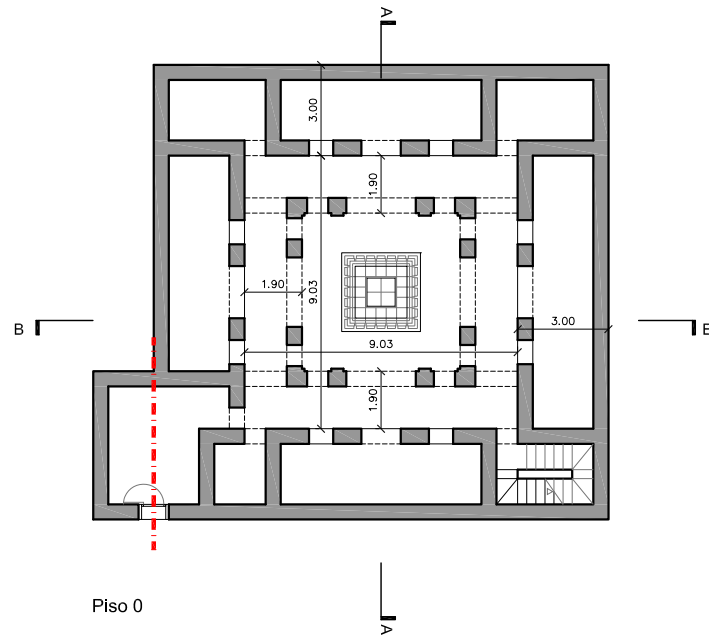
Sobreposição da Compartimentação do Piso 1

— Piso 0 — Piso 1 — Piso 2 — Sobreposição de compartimentações

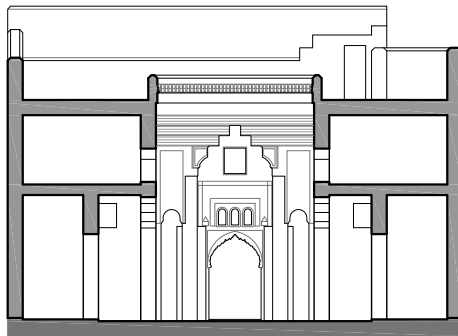
QUADRO ANALÍTICO V.IV - DAR CHARIFA

DAR CHARIFA - LEVANTAMENTO

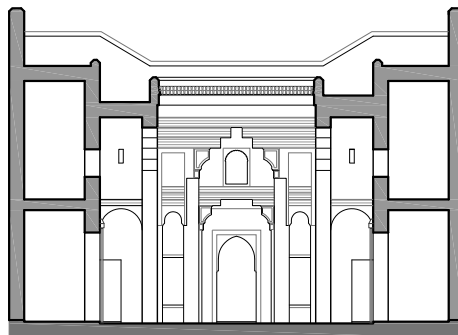
escala 1:250



Piso 0



Corte A



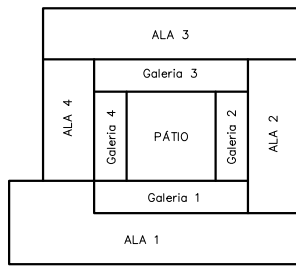
Corte B

--- Limite do 2º Anel

QUADRO ANALÍTICO V.IV - DAR CHARIFA (cont.)

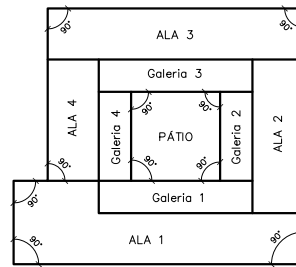
ANÁLISE VOLUMÉTRICA

Alas e Galerias



Piso 0

Ângulos das Alas



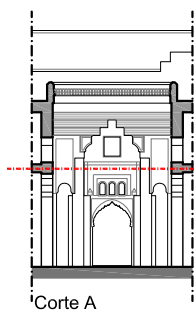
Piso 0

ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO DOS ALÇADOS DO PÁTIO

Composição dos Alçados do Pátio

Nivelamento dos Alçados

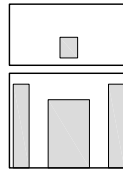
Correspondência entre vãos de pisos diferentes



Piso 1
Piso 0

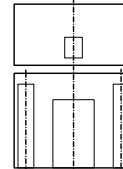
Corte A

Alçado 6

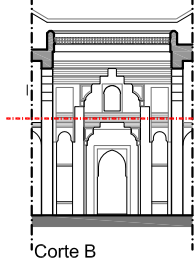


Alçado 2

Alçado 6



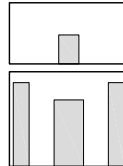
Alçado 2



Piso 1
Piso 0

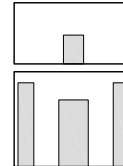
Corte B

Alçado 5



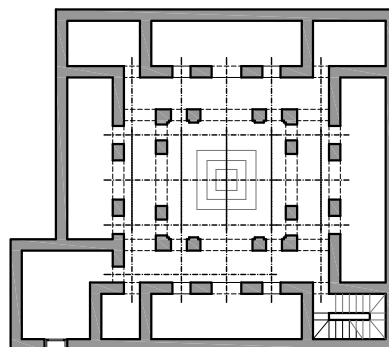
Alçado 1

Alçado 5



Alçado 1

Correspondência entre os Alçados do Pátio



Piso 0

ANÁLISE DA CONFIGURAÇÃO PLANIMÉTRICA

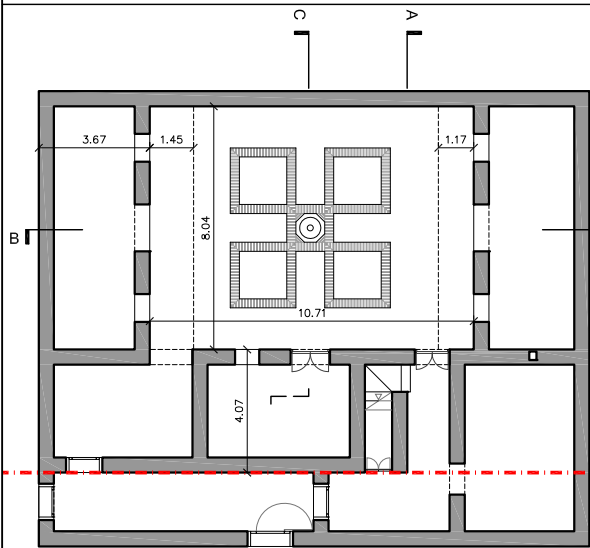
Nota: O piso 1 não foi documentado não sendo por isso possível proceder à análise da configuração planimétrica.

— Piso 0 — Piso 1 — Piso 2 — Sobreposição de compartimentações

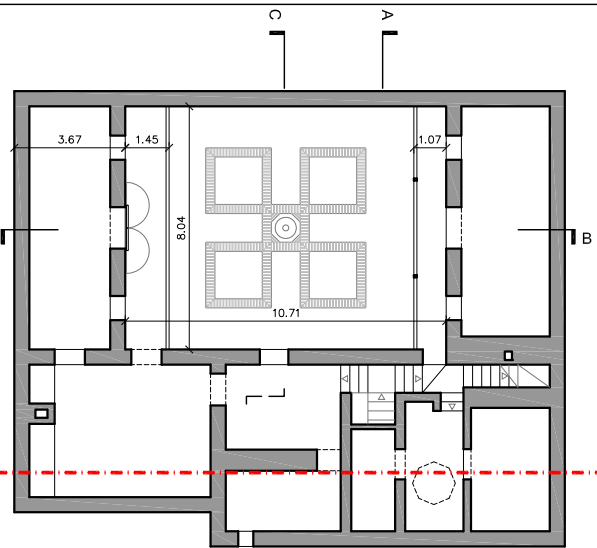
QUADRO ANALÍTICO V.V - DAR DOUNIA

LEVANTAMENTO

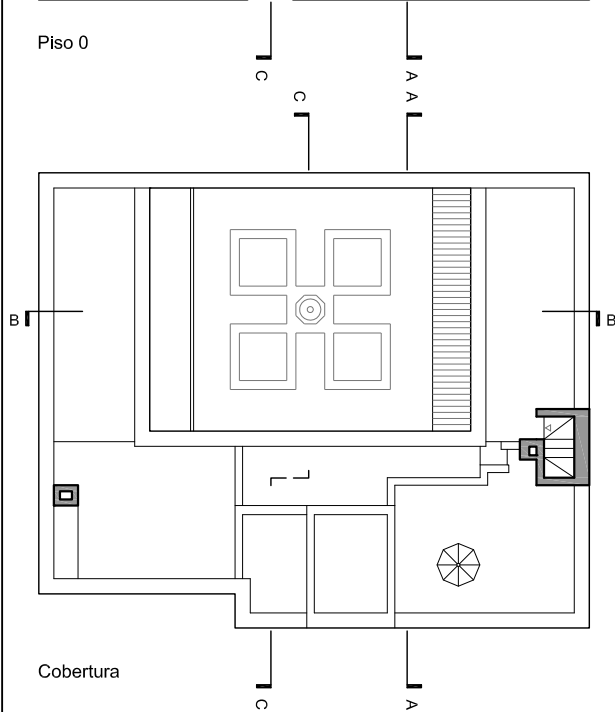
escala 1:250



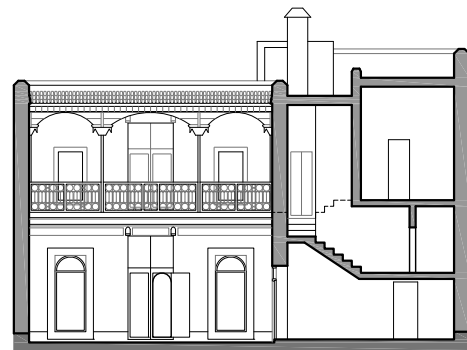
Piso 0



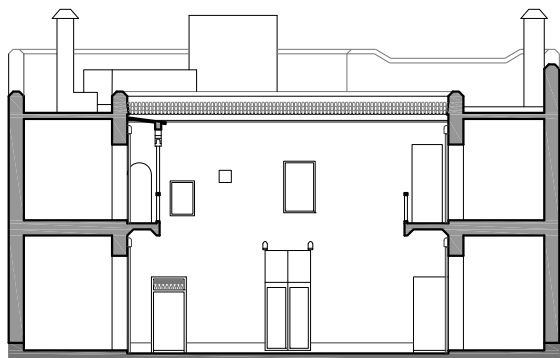
Piso 1



Cobertura



Corte A



Corte B



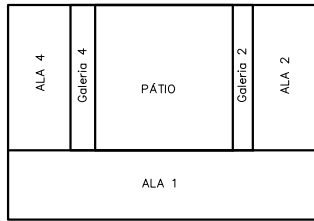
Corte C

--- Limite do 2º Anel

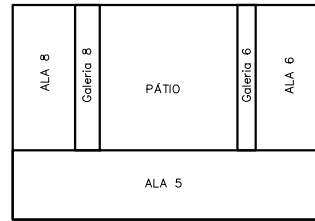
QUADRO ANALÍTICO V.V - DAR DOUNIA (cont.)

ANÁLISE VOLUMÉTRICA

Alas e Galerias

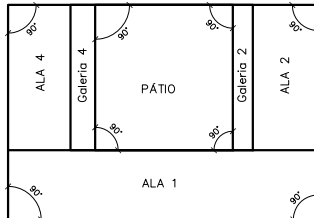


Piso 0

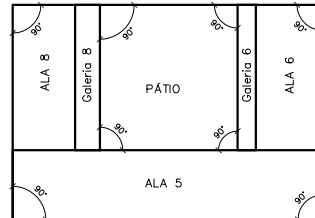


Piso 1

Ângulos das Alas



Piso 0



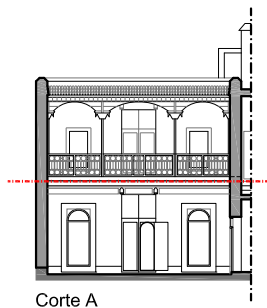
Piso 1

ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO DOS ALÇADOS DO PÁTIO

Composição dos Alçados do Pátio

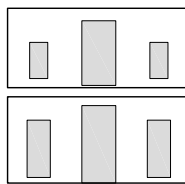
Nivelamento dos Alçados

Correspondência entre vãos de pisos diferentes



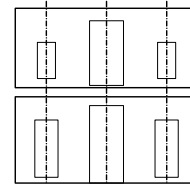
Corte A

Alçado 6

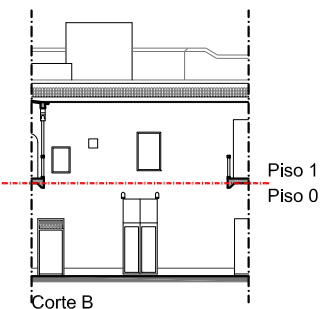


Alçado 2

Alçado 6

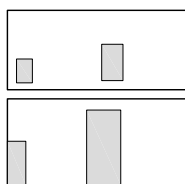


Alçado 2



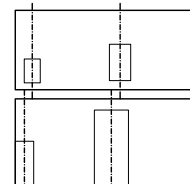
Corte B

Alçado 5



Alçado 1

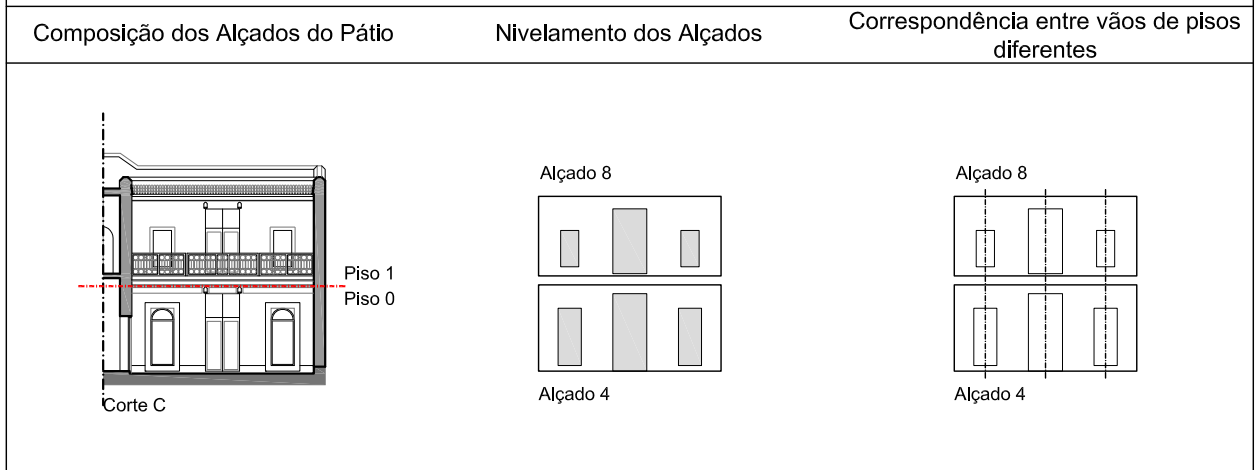
Alçado 5



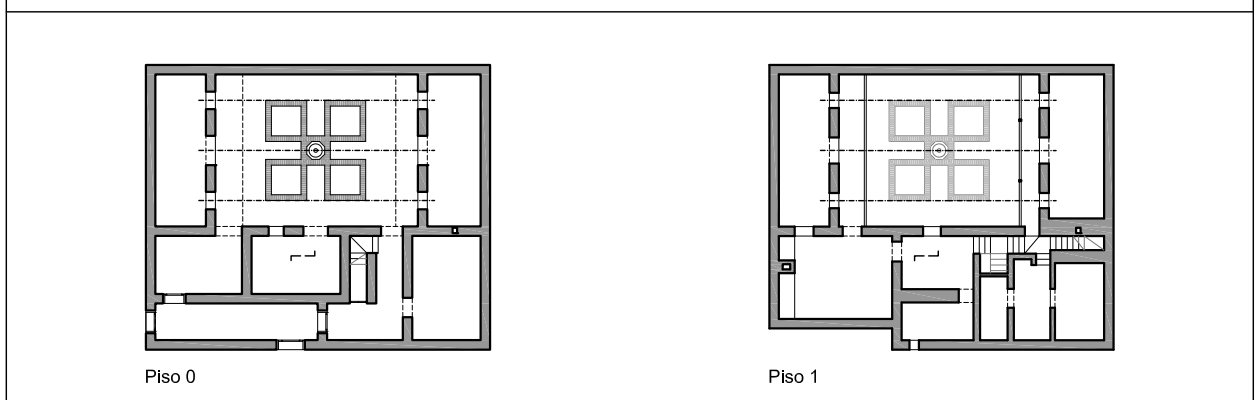
Alçado 1

QUADRO ANALÍTICO V.V - DAR DOUNIA (cont.)

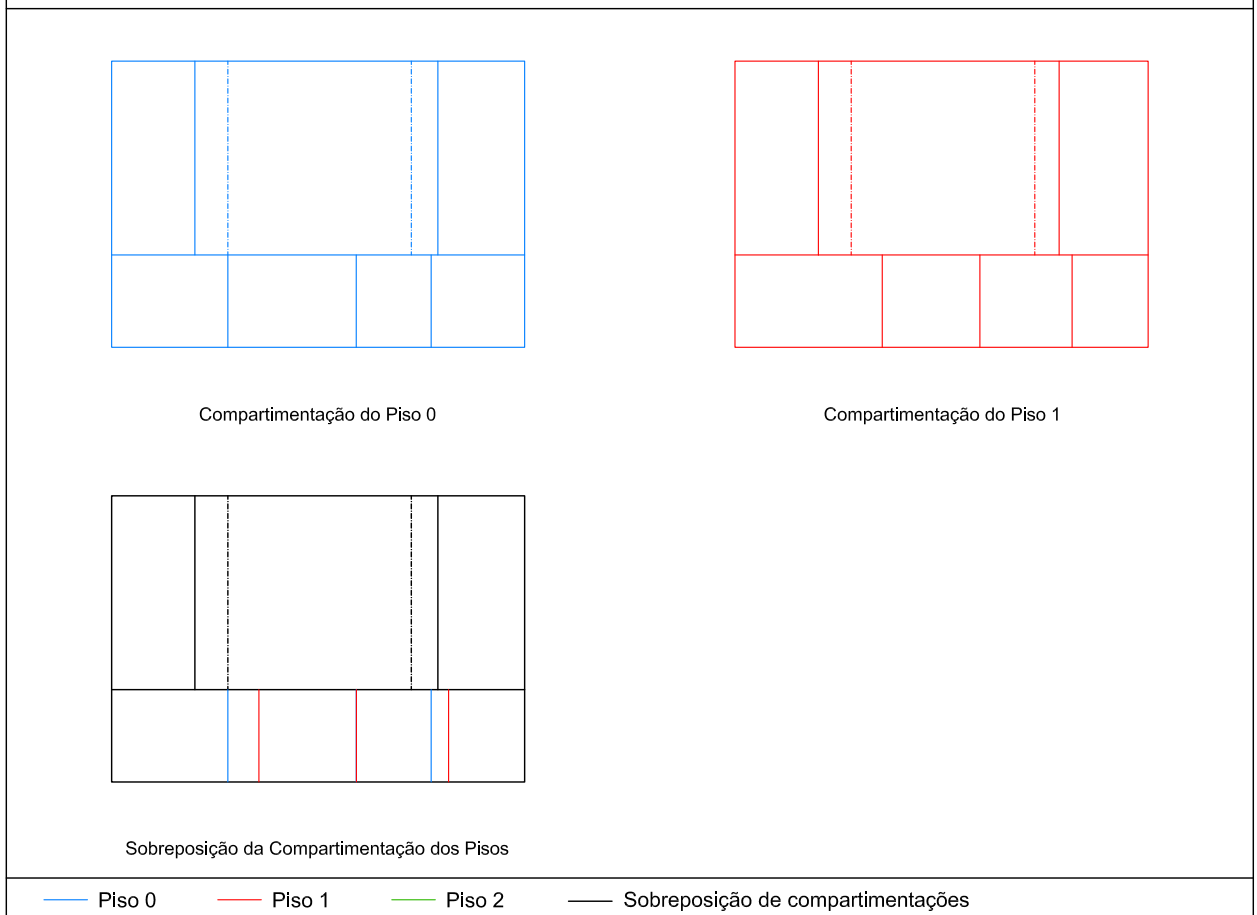
ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO DOS ALÇADOS DO PÁTIO



Correspondência entre os Alçados do Pátio



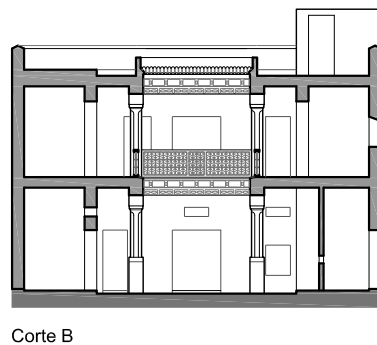
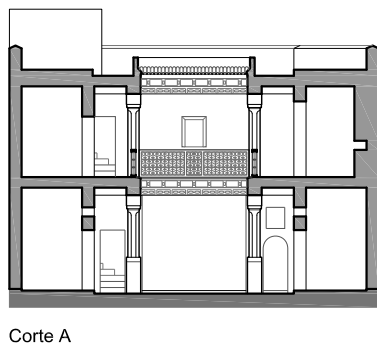
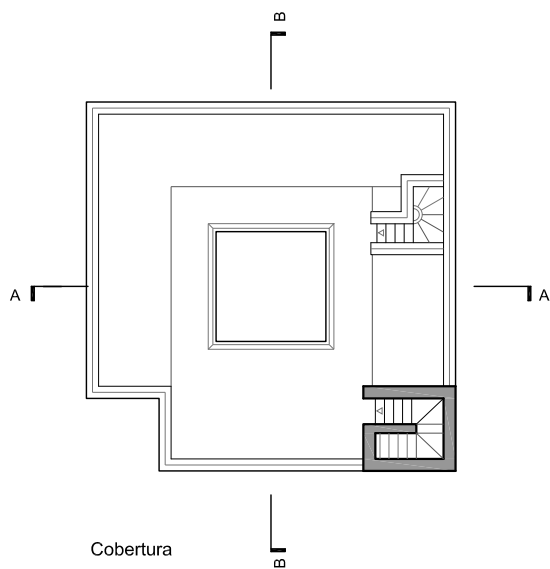
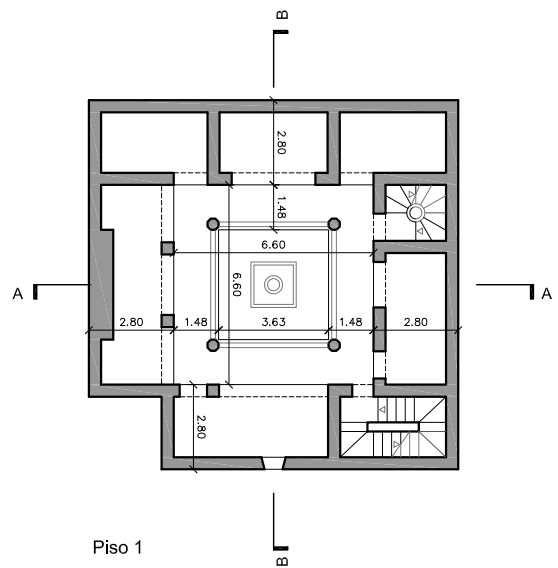
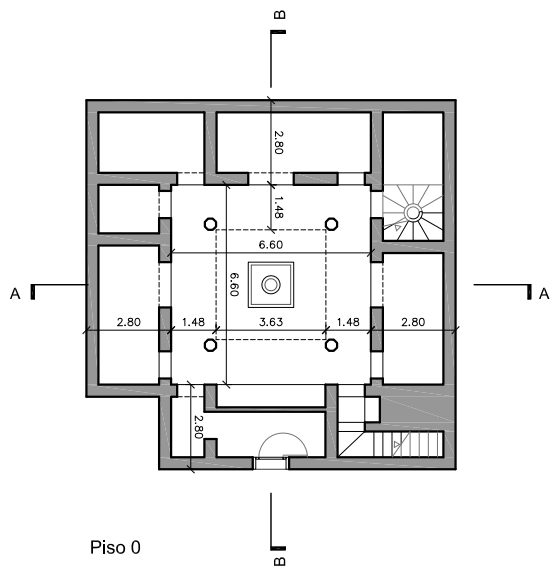
ANÁLISE DA CONFIGURAÇÃO PLANIMÉTRICA



QUADRO ANALÍTICO V.VI - DAR FOUNDOUK

LEVANTAMENTO

escala 1:250



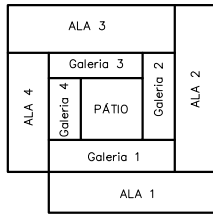
--- Limite do 2º Anel

QUADRO ANALÍTICO V.VI - DAR FOUNDOUK (cont.)

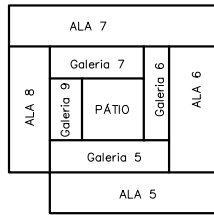
ANÁLISE VOLUMÉTRICA

Alas e Galerias

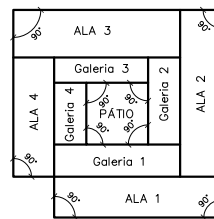
Ângulos das Alas



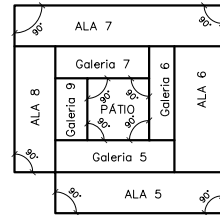
Piso 0



Piso 1



Piso 0



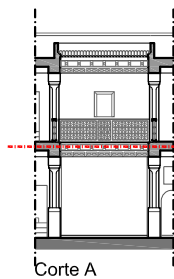
Piso 1

ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO DOS ALÇADOS DO PÁTIO

Composição dos Alçados do Pátio

Nivelamento dos Alçados

Correspondência entre vãos de pisos diferentes



Corte A

Piso 1
Piso 0

Alçado 5



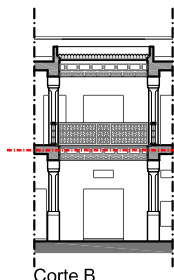
Alçado 1



Alçado 5



Alçado 1



Corte B

Piso 1
Piso 0

Alçado 6



Alçado 2



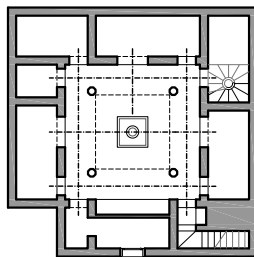
Alçado 6



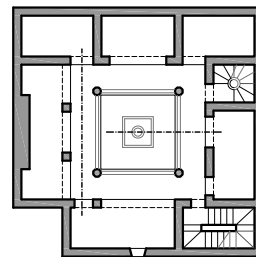
Alçado 2



Correspondência entre os Alçados do Pátio

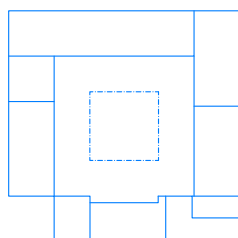


Piso 0

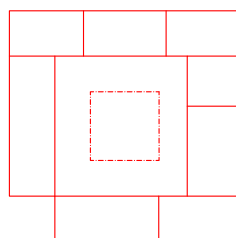


Piso 1

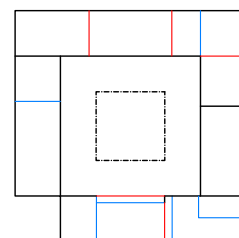
ANÁLISE DA CONFIGURAÇÃO PLANIMÉTRICA



Compartimentação do Piso 0



Compartimentação do Piso 1



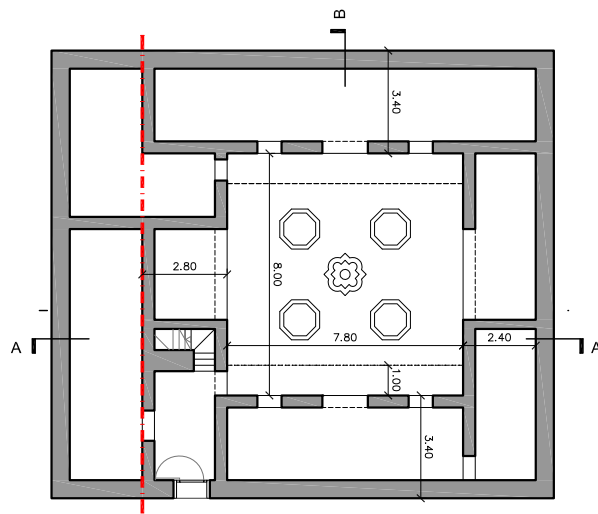
Sobreposição da Compartimentação do Piso 1

— Piso 0 — Piso 1 — Piso 2 — Sobreposição de compartimentações

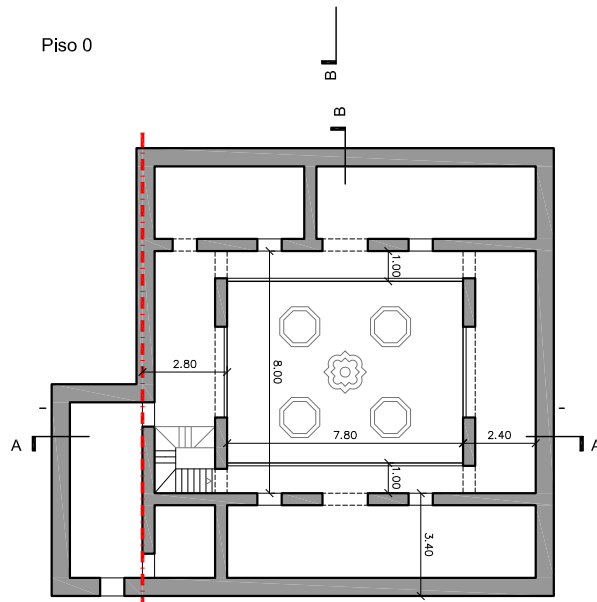
QUADRO ANALÍTICO V.VII - DAR FRANCES

LEVANTAMENTO

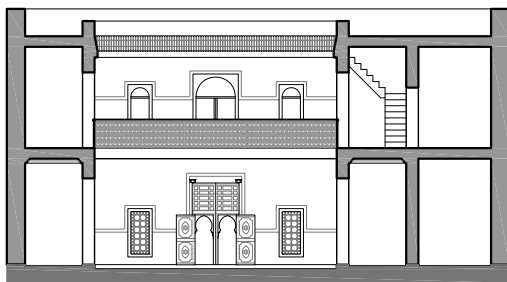
escala 1:250



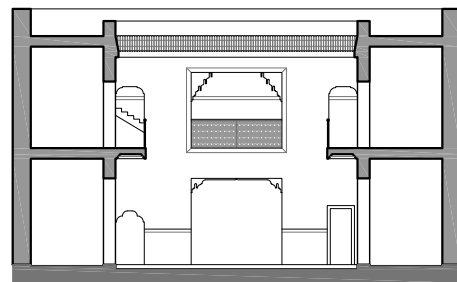
Piso 0



Piso 1



Corte A



Corte B

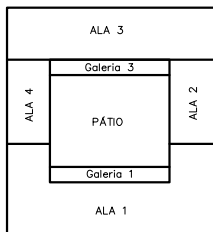
--- Limite do 2º Anel

QUADRO ANALÍTICO V.VII - DAR FRANCES (cont.)

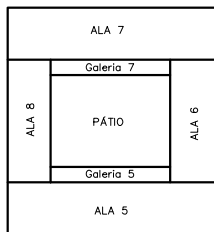
ANÁLISE VOLUMÉTRICA

Alas e Galerias

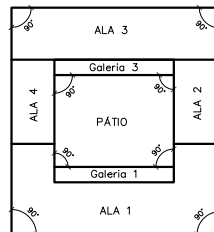
Ângulos das Alas



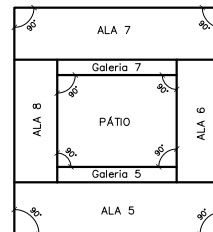
Piso 0



Piso 1



Piso 0



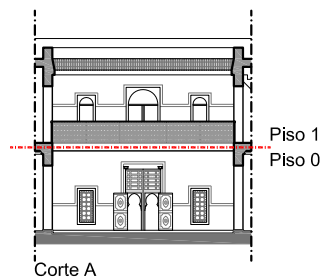
Piso 1

ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO DOS ALÇADOS DO PÁTIO

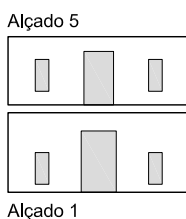
Composição dos Alçados do Pátio

Nivelamento dos Alçados

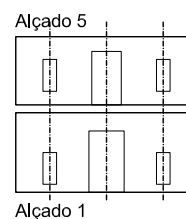
Correspondência entre vãos de pisos diferentes



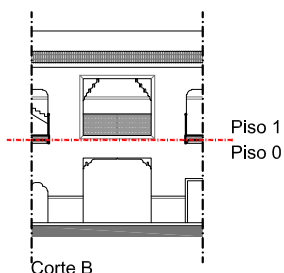
Corte A



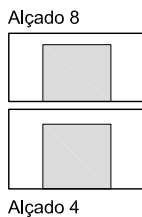
Alçado 1



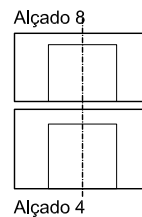
Alçado 1



Corte B

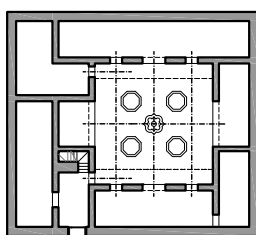


Alçado 4

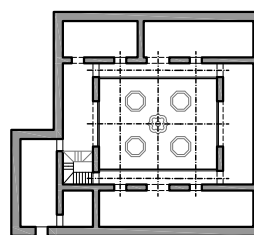


Alçado 4

Correspondência entre os Alçados do Pátio

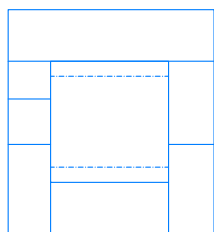


Piso 0

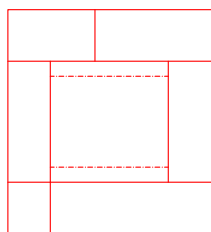


Piso 1

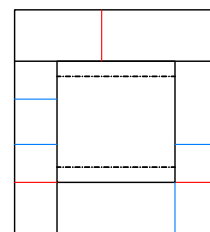
ANÁLISE DA CONFIGURAÇÃO PLANIMÉTRICA



Compartimentação do Piso 0



Compartimentação do Piso 1



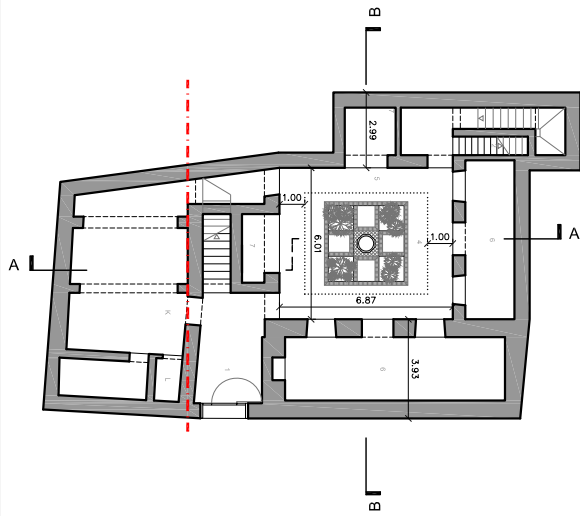
Sobreposição da Compartimentação do Piso 1

— Piso 0 — Piso 1 — Piso 2 — Sobreposição de compartimentações

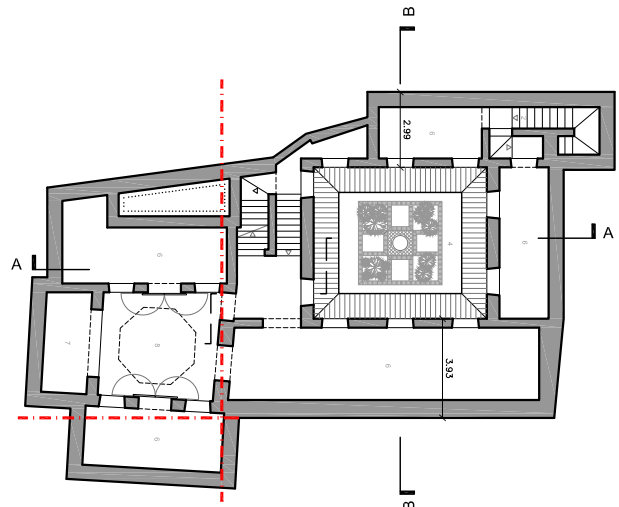
QUADRO ANALÍTICO V.VIII - DAR HANNAH

LEVANTAMENTO

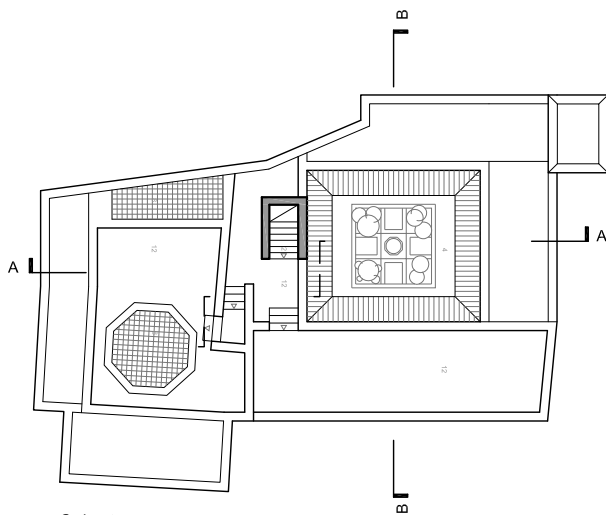
escala 1:300



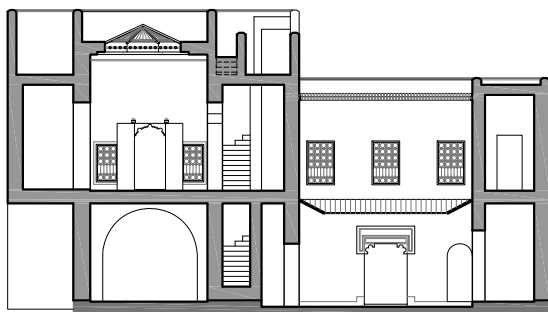
Piso 0



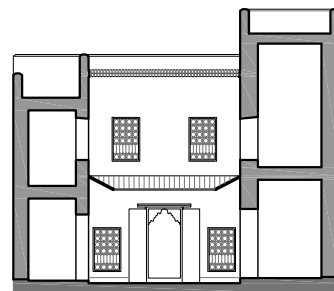
Piso 1



Cobertura



Corte A



Corte B

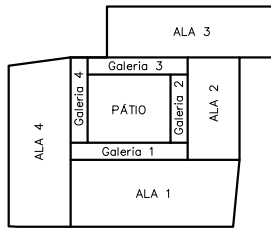
--- Limite do 2º Anel

QUADRO ANALÍTICO V.VIII - DAR HANNAH (cont.)

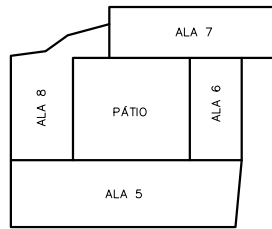
ANÁLISE VOLUMÉTRICA

Alas e Galerias

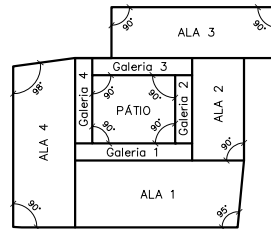
Ângulos das Alas



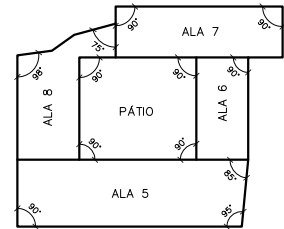
Piso 0



Piso 1



Piso 0



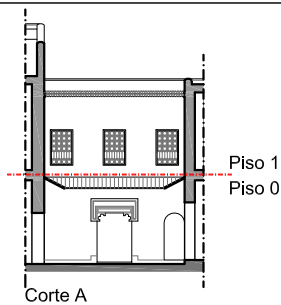
Piso 1

ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO DOS ALÇADOS DO PÁTIO

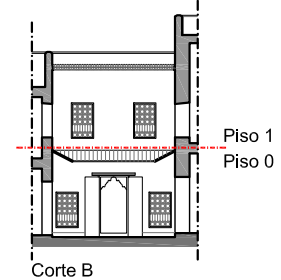
Composição dos Alçados do Pátio

Nivelamento dos Alçados

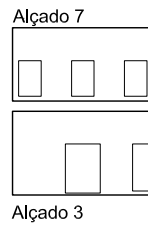
Correspondência entre vãos de pisos diferentes



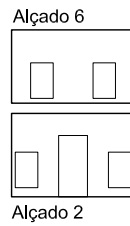
Corte A



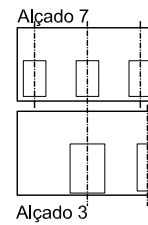
Corte B



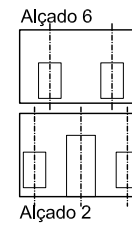
Alçado 7



Alçado 2

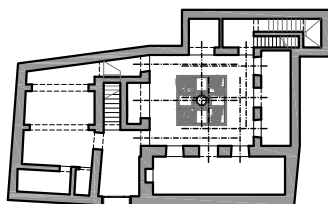


Alçado 3

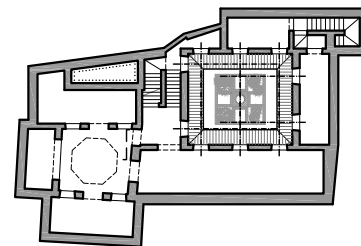


Alçado 2

Correspondência entre os Alçados do Pátio

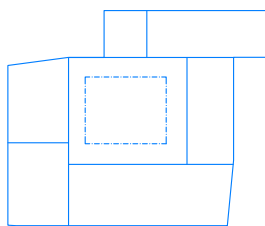


Piso 0

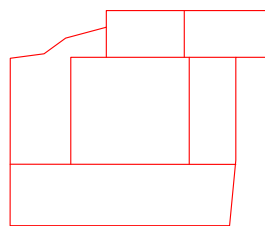


Piso 1

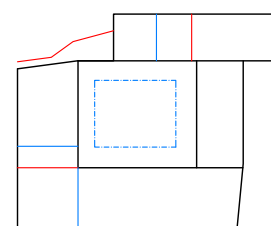
ANÁLISE DA CONFIGURAÇÃO PLANIMÉTRICA



Compartimentação do Piso 0



Compartimentação do Piso 1



Sobreposição da Compartimentação do Piso 1

— Piso 0 — Piso 1 — Piso 2 — Sobreposição de compartimentações