

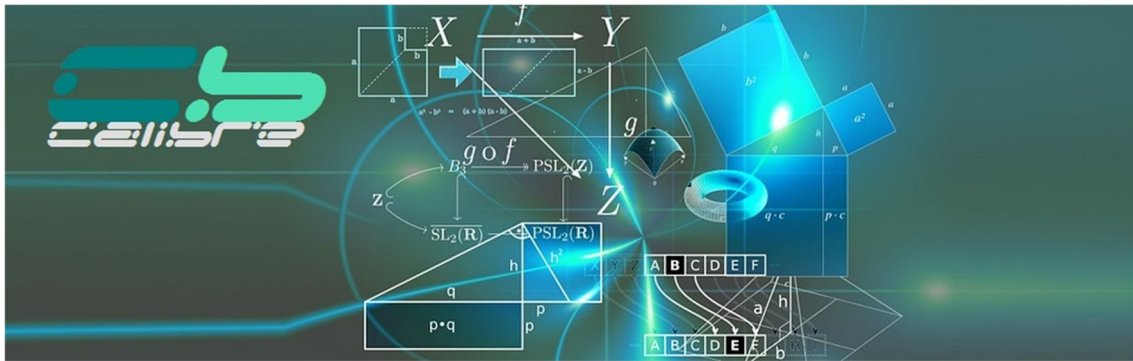
Neste número:
uma teoria quântica
do espaço-tempo

A relação estrutura-
arquitetura

Engenharia do
Caos:
auto-organização e
controle

CALIBRE

*Um ano promovendo
ciência de qualidade*



Brasília, 27/11/2017.

Carta do Editor

A CALIBRE (Revista Brasiliense de Engenharia e Física Aplicada) comemora com esta edição seu primeiro ano desde a criação em Dezembro de 2016. Foram 300 páginas de abordagens científicas de qualidade, em sua grande maioria contribuições originais, distribuídas em edições trimestrais, com artigos em inglês, francês e português, contando com a participação de autores de diversas instituições como UnB, UERJ, UNIP e UFRA, além de autores da Faculdade ICESP, claro. Tivemos a participação singela e importante de Richard Brook Cathcart, uma das maiores autoridades em geoengenharia da atualidade. Houve a edição especial comemorativa dos 23 anos da minha parceria acadêmica com o Professor José Abdalla Helayël-Neto, do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF). Registramos, assim, um legado institucional construído com grande responsabilidade e consideração por todos aqueles que nos apoiam. Devido à expressiva quantidade de manuscritos que nos chegam, esperamos solicitar registro, ao final do próximo ano, em alguns dos principais indexadores à disposição.

Não é tarefa simples manter um periódico trimestral científico em nossa cultura. É preciso persistência e conservação de uma ampla rede de relacionamentos na comunidade de pesquisadores e docentes. Como Editor Científico, mais uma vez eu gostaria de convocar nossos potenciais contribuidores para que participem, lembrando que só se consagra um periódico com muito esforço e espírito empreendedor. Boa parte dos meus próprios manuscritos, constituindo considerável parcela do que de melhor tenho produzido, venho destinando, com desprendimento e orgulho, à revista CALIBRE, por acreditar no projeto e por ter consciência daquilo que deve ser feito em prol da verdadeira educação e do senso de oportunidade para professores e estudantes que desejam ingressar numa jornada intelectual mais aprimorada.

Deixo aqui minha gratidão ao NIP, à Coordenação de Engenharia Civil, aos autores e à Faculdade ICESP pela confiança e pelos ensejos, estimando que todos tenham ótimas festas e um promissor 2018.

Nilo Silvio Costa Serpa

Editor Científico

índice

ARTIGOS ORIGINAIS

RECUPERAÇÃO E REPLICAÇÃO NA RELAÇÃO ESTRUTURA – ARQUITETURA:
Por um Patrimônio Mundial Baseado na Simulação Digital

Iberê Pinheiro de Oliveira, Jéssica Brandão, João da Costa Pantoja, Aline M.C. Santoro 1-11

ENCÁOSTICA, A ENGENHARIA DO CAOS:
Construindo Sistemas Acadêmicos Dinâmicos

Nilo Sylvio Costa Serpa, Marcelo Alcântara, Emilly Moura da Cruz 12-21

THÉORIE QUANTIQUE DE L'ESPACE-TEMPS:
Principes Physiques et Philosophiques

Nilo Sylvio Costa Serpa 22-27





Recuperação e Replicação na Relação

Estrutura – Arquitetura

Por um Patrimônio Mundial Baseado na Simulação Digital

Iberê Pinheiro de Oliveira

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil

Jéssica Brandão

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil

João da Costa Pantoja

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil

Aline M. C. Santoro

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil

Received: 04 Sept 2017 _____ / Accepted: 18 Sept 2017 _____ / Published: 27 Nov 2017 _____.

Abstract: This paper discusses the possibility of designing strategies for the recovery of architectural works by means of computational simulations. A case study was done on the Dom Bosco Sanctuary. In order to recuperate Sanctuary's architectural design (which cannot be found), detailed researches were conducted, as well as measurements *in locus*, so that it was feasible to digitally recreate both the design and the construction process. Starting from digital simulations, the authors were able to analyse the interrelation between Sanctuary's conceptual process and its physical structure, from which the elements themselves are used to create architecture and to decorate it.

Key words: structure as architecture; digital simulation; modernist movement; exposed structure.

1. Introdução

1.1 Estruturas Aparentes

Sabe-se, há muito tempo, que a apreensão da arquitetura está intimamente ligada à apreciação da estrutura arquitetônica. Conforme já dizia Vitruvius

Autora correspondente: Aline M. C. Santoro, arquiteta, áreas de pesquisa: estruturas em concreto armado. E-mail: alinemcsantoro@gmail.com.

[1], são componentes básicos da arquitetura a “comodidade”, a “beleza” e a “firmeza”, sendo esta a primordial. Enquanto a “comodidade” se refere a aspectos funcionais e a “beleza” a sensibilidades estéticas, a “firmeza” se baseia na habilidade arquitetônica de manter a integridade física por determinado tempo, em determinado ambiente e, assim sendo, o elemento principal desse componente é a estrutura. A ação de projetar edificações, portanto, caminha em paralelo com a ação de projetar estruturas, seja esta intencional ou não.

Muito arquitetos, ao longo da história, defenderam o ideal de que a estrutura deve ser

necessariamente definidora da forma arquitetônica. Como disse Viollet-le-Duc [2], ao se referir à arquitetura gótica do século XVIII, “Imponha-me um sistema estrutural e naturalmente encontrarei as formas que devem resultar. Mas, se você mudar a estrutura, serei obrigado a mudar as formas”. Apesar de sua proposição se referir especificamente a materiais construtivos de sua época, que se faziam, pelo tamanho e peso, mais expressivos nas obras, a sua máxima perdurou; e continua a ser um importante elemento formativo em inúmeras obras.

Ainda nos tempos modernos, Nervi [3] reconhece a fusão dos aspectos estéticos, estáticos e construtivos. Segundo o autor, há, nas obras do passado, conexão estreita e indissolúvel da expressividade estética com a sustentação estrutural. Torna-se, dessa forma, difícil identificar se na origem de tais feitos arquitetônicos estava a abstrata inspiração estética ou a intuição estático-construtiva. Dizia ele, ainda, que o caráter da construção não depende das silhuetas das molduras, das dimensões das esquadrias, ou qualquer elemento decorativo, mas sim do relacionamento entre a forma, o volume e as características da estrutura portante, ou seja, os elementos que definem o esqueleto do organismo estrutural. E prosseguia:

A mais alta prioridade do artista é a de sintetizar naturalmente, e até involuntariamente, sentimentos característicos de seu tempo e traduzi-los de forma eloquente para todos. (...) O projetista deve estudar cuidadosamente, com desenhos, ou melhor, com modelos físicos, cada nó importante, procurando compreender a forma com que o fluxo das forças se distribui entre a armadura e o conglomerado, buscando dispor os elementos de modo que essa distribuição seja a mais simples e espontânea possível. [3]. (livre tradução dos autores).

Macdonald, ao tratar da relação entre arquitetura e estrutura, distingue cinco maneiras em que a

arquitetura pode ser influenciada pela solução estrutural: ornamentação da estrutura; estrutura como enfeite; estrutura como arquitetura; estrutura como geradora da forma; e estrutura ignorada. Na “ornamentação da estrutura”, edifícios consistem em pouco mais que a forma estrutural, esta última sendo minimamente ajustada para efeitos visuais, como nos templos gregos e catedrais góticas. Em contrapartida, na “estrutura como enfeite”, a manipulação de elementos estruturais é puramente estética e simbólica, muitas vezes dando origem a estruturas pouco eficientes. As soluções estruturais são escolhidas pela aparência e não pela eficiência.

A “estrutura como arquitetura” refere-se a edificações formadas pela estrutura pura, ou “estrutura sem ornamento”. Sua forma é determinada somente pelo critério técnico e o encanto arquitetônico se dá por meio da valoração da forma estrutural pura. Dessa forma, a solução estrutural atribuída a desafios arquitetônicos, como grandes vãos ou grande alturas, se torna uma forma de arte. Por outro lado, a “estrutura como geradora da forma” refere-se a edificações em que a arquitetura segue a forma estrutural, porém esta não necessariamente é exposta, ou seja, a estrutura não é glorificada, como na “estrutura como arquitetura”, mas aceita e explorada. Princípio gerador do vocabulário visual da arquitetura moderna, influenciou em grande parte a arquitetura de Le Corbusier, em que a forma estrutural favorecida – a laje plana de concreto armado – é fortemente explorada para gerar a forma arquitetônica.

1.2 Brasília: considerações gerais

Sobre Brasília, foi Rossetti quem nos trouxe uma pequena joia memorial, que vale a pena ser transcrita:

Pensar em Brasília é pensar em arquitetura. Pensar em Brasília é pensar na cidade que foi erguida num território vazio e que se definiu como imagem, como

lugar e como símbolo através da arquitetura. As fotografias da construção, as filmagens dos canteiros de obras, as memórias dos candangos, o ritmo frenético do processo construtivo, a inauguração mítica, os palácios transparentes e o imenso horizonte aberto do cerrado, tudo isso se funde e constrói uma percepção complexa do que a cidade-capital representa hoje através de sua arquitetura. [4]

De acordo com o autor, Brasília, cidade-capital, nasceu lado a lado com a arquitetura. Tanto sua concepção, com o concurso ganho por Lúcio Costa, quanto sua execução, pelo arquiteto Oscar Niemeyer, foram enraizados nos princípios e ideais do movimento arquitetônico modernista. Observa-se, portanto, nas principais edificações da cidade, certa dominância da planta livre – onde a vedação independe da estrutura –; dos grandes vãos; da arquitetura escultural; da estrutura aparente. Muitos edifícios eram caracterizados pela própria estrutura, assim como disse Niemeyer [5]: “incorporei a arquitetura ao sistema estrutural, permitindo que, terminada uma estrutura, ela também estivesse presente [...]. Integrava-a na técnica mais avançada, no vão maior, nos balanços imensos, nela caracterizando o apuro do concreto armado.”

Niemeyer, então, conferiu à cidade a sua essência, compartilhando, com outros arquitetos, a missão de conduzi-la. Eis que, de 1963 a 1970, o arquiteto Carlos Alberto Naves projetou e construiu o Santuário Dom Bosco (visto na Figura 1) em homenagem ao Padroeiro da cidade São João Belchior Bosco. Iniciativa da Congregação Salesiana em parceria com o Governo Federal, situa-se na Quadra 702 Sul do Plano Piloto, todo de concreto aparente. A sua concepção estrutural e construtiva, entretanto, foi perdida e, por esse motivo, fizeram-se necessários, vistorias, levantamentos *in loco* e simulações computacionais para recuperar seu acervo e analisá-lo

de forma a melhor compreender a influência da estrutura na arquitetura.

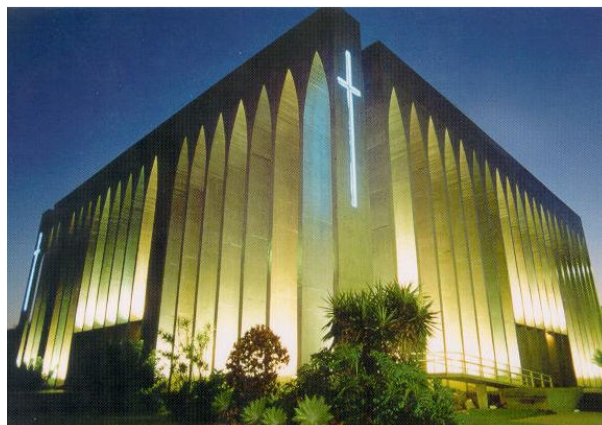


Figura 1: Vista noturna do Santuário Dom Bosco.

Fonte: acervo particular dos autores.

A recuperação do acervo documental do Santuário tem como objetivo auxiliar no tombamento isolado por integrantes de Sítio Histórico Urbano Nacional - SHUN, de Conjunto Urbano de Monumentos Nacionais - CUMN, e respectivas vizinhanças e, dessa forma, os projetos deverão atender as recomendações estabelecidas pelo IPHAN e receber a prévia aprovação dos Projetos de Intervenção em Bens do Patrimônio Cultural, em conformidade com as disposições do Decreto Lei nº 25, de 30/11/1937. Para este fim, fizeram-se necessários: o conhecimento do bem, e do seu significado atual e ao longo do tempo; o conhecimento da sua evolução e, principalmente, dos valores pelos quais foi reconhecido como patrimônio cultural. O primeiro tem o objetivo de conhecer e analisar a edificação sob os aspectos históricos, estéticos, artísticos, formais e técnicos, enquanto que o segundo focaliza uma pesquisa histórica que vise sistematizar as informações obtidas por meio de pesquisas arquivísticas, bibliográficas e de fontes orais, objetivando conhecer e situar a edificação no

tempo, identificando sua origem e o seu percurso histórico.



2. Metodologia

Para o trabalho em questão, foi feito um estudo bibliográfico sobre a influência da estrutura na arquitetura e sobre esse fenômeno na cidade-capital, Brasília. Foi feito, ainda, um levantamento da documentação existente sobre o Santuário na sua secretaria, no Acervo Público de Brasília e na Gerência de Aprovação de Projetos do GDF. Posteriormente, realizaram-se vistorias *in loco*, execução de registro fotográfico, análise dos sistemas estruturais envolvidos e sua relação com a forma arquitetônica. Possibilitou-se, dessa forma, a execução do projeto no software AutoCAD e sua posterior modelagem em programas de desenho tridimensionais assistidos por computador, como o Sketchup, o Revit e o Rhinoceros.

3. Resultados e Discussões

Ao analisar as relações da arquitetura com a estrutura no Santuário Dom Bosco, percebe-se uma interligação dos conceitos apresentados por Macdonald [1]. Ao mesmo tempo em que a estrutura configura tanto a forma quanto a própria arquitetura, pode-se observar, ademais, a estrutura como elemento decorativo. A edificação é formada essencialmente por quatro blocos independentes de pórticos finalizados em arcos ogivais, dispostos perpendicularmente de forma a criar quatro fachadas quase idênticas (Figura 2). Enquanto essa estrutura compõe a arquitetura da igreja, e, em conjunto com as treliças internas, ordena a sua forma, o uso dos arcos remete simbolicamente à reinterpretção modernista de elementos do catolicismo – a arquitetura gótica.



Figura 2: Foto da vista externa – sem identificação de data. Fonte: acervo do SDB.

3.1 Sobre as fachadas

Com base nos levantamentos e medições verificou-se que os pórticos são compostos por colunas com 20 metros de altura unidas ao alto em arcos ogivais. O conjunto de colunas forma um quadrado de 40x40 metros. Os pilares de concreto possuem seção de 230x30cm, e sua altura, em conjunto com a esbeltez dos pórticos, dá leveza ao edifício. Com essas informações, foi feita uma recomposição do cronograma executivo da obra, com a finalidade de observar cuidadosamente as etapas de concretagem e o sequenciamento construtivo, para então entender as questões de estabilidade nas diferentes fases executivas da estrutura final, conforme idealizado no projeto arquitetônico. Observa-se ainda que o efeito do acabamento em concreto aparente exigiu do construtor um controle primoroso das formas e um rígido controle tecnológico de propriedades do concreto como fluidez e *slump*.

De acordo com as fotos históricas localizadas, pode-se perceber que a concretagem dos pilares que compõem a fachada foi executada em três estágios, face a complexidade do modelo arquitetônico e a esbeltez do elemento estrutural conforme ilustra a Figura 3. Essa figura ilustra até onde foi cada fase da

concretagem da obra com uma linha vermelha. Observa-se, então, que no primeiro estágio de concretagem foram montadas as faces dos pilares e as laterais dos arcos; no segundo estágio executou-se o preenchimento dos pilares e dos arcos; no terceiro, a concretagem da laje.

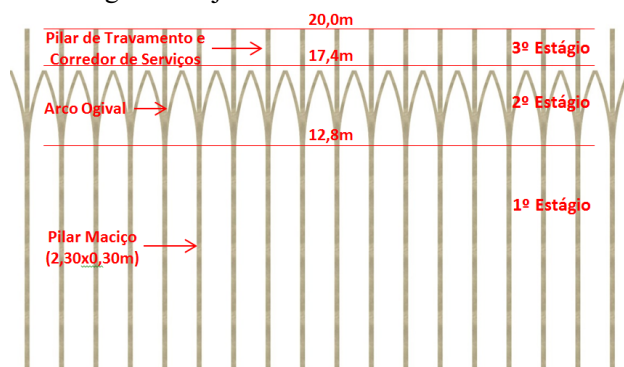


Figura 3: Croquis indicando os estágios de concretagem. Fonte: acervo particular dos autores.

A Figura 4 expõe nitidamente o primeiro estágio, onde foram montadas as faces interna e externa dos pilares e as laterais dos arcos já com os nichos para posicionamento futuro das treliças metálicas.

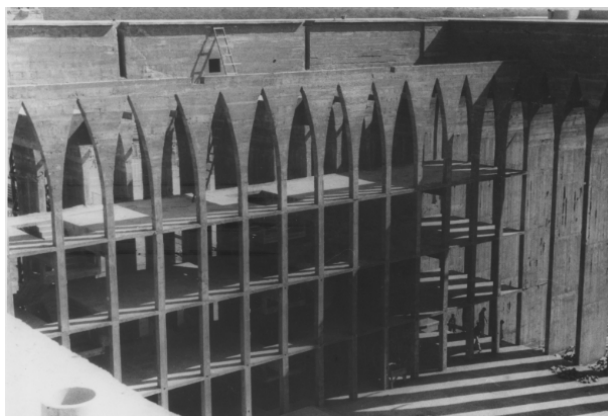


Figura 4: Vista interna da construção – sem identificação de data. Fonte: acervo do SDB.

Neste estágio, foi executado o travamento dos pilares ao longo de sua altura para evitar o colapso dos elementos por flambagem, conforme demonstrado no

esquema isométrico a seguir (Figura 5). Evidenciaram-se, nessa etapa, solicitações nas fundações na forma de momentos fletores, gerando a necessidade de engastá-las.

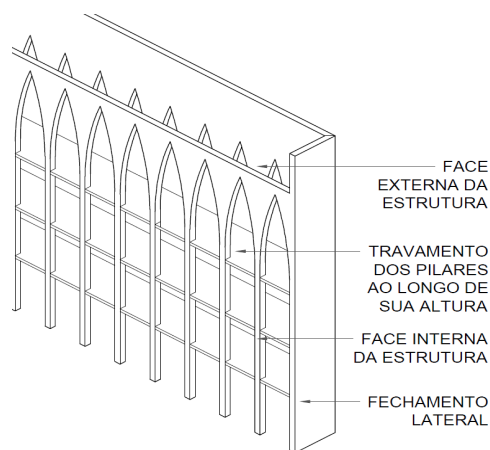


Figura 5: Isométrico do conjunto de arcos ogivais: primeira etapa de concretagem. Fonte: acervo particular dos autores.

No segundo estágio, os pilares e arcos foram preenchidos unindo todos os pilares construídos no primeiro estágio e fornecendo mais rigidez ao pórtico que configura a fachada da edificação, conforme a Figura 6.

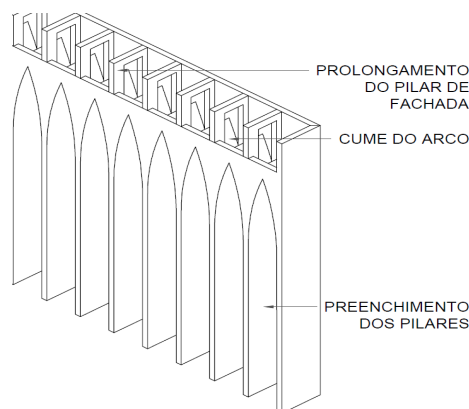


Figura 6: Isométrico do conjunto de arcos ogivais: segunda etapa de concretagem. Fonte: acervo particular dos autores.

Pode-se perceber esta sequência, ainda, analisando uma foto tirada na parte interna do corredor de serviços (Figura 7).



Figura 7: Vista da parte interna do corredor de serviço. Fonte: acervo particular dos autores.

No terceiro estágio - concretagem da laje do corredor de serviços – percebeu-se que os elementos da platibanda em conjunto com a laje do corredor de serviços fazem o travamento final do pórtico.

3.2 Encaixes e apoios das treliças

Com as fachadas montadas e os pórticos de concreto estabilizados, as treliças metálicas foram encaixadas nos nichos deixados na parte interna do corredor de serviços, conforme a Figura 8.

Nessa etapa de montagem, denominada terceiro estágio, o projeto arquitetônico e estrutural convergiu, possibilitando uma execução segura e ágil da obra. Parte da treliça metálica pode ficar apoiada sobre a fachada estruturada rigidamente, sem necessidade de grande volume de andaimes ou apoios.



Figura 8: Vista da montagem das treliças do telhado. Fonte: acervo do SDB.

Os apoios da treliça sobre a parte interna do corredor de serviços estão inacessíveis, mas um modelo virtual do Santuário Dom Bosco foi criado com auxílio do *software* SketchUp, com a finalidade de representar os apoios. Nesse modelo foram levadas em conta condições de apoio simples, sem transmissão de esforços de momento fletor. A treliça do telhado, na condição final da estrutura, trabalha como uma viga bi-apoiada nos pórticos de concreto que compõem as fachadas. As Figuras 9 e 10 abaixo exibem esse apoio. O elemento estrutural treliça permanece apoiado no nicho de concreto existente.



Figura 9: Detalhe do apoio da treliça metálica *in loco*.
Fonte: acervo particular dos autores.

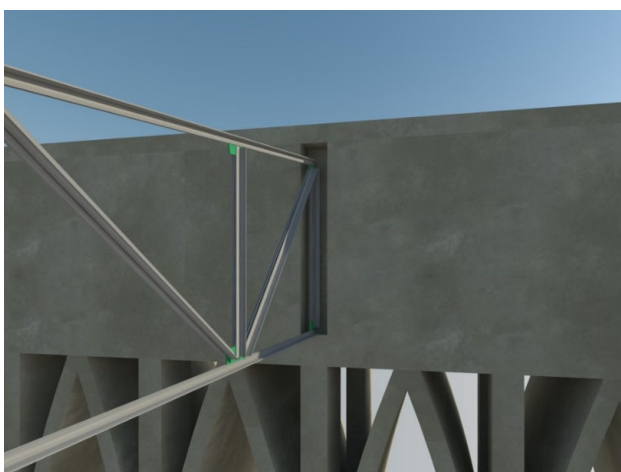


Figura 10: Detalhe do apoio da treliça metálica no modelo virtual. Fonte: acervo particular dos autores.

Para garantir a sustentação do grandioso lustre e do forro (Figura 11), dois modelos de treliças metálicas foram elaborados e dispostos perpendiculares entre si conforme visto anteriormente na Figura 8.



Figura 11: Vista interna da edificação – sobrecarga de utilização forro e lustre. Fonte: acervo do SDB.

Ambos os modelos de treliça foram elaborados em cantoneiras laminadas que se cruzam perpendicularmente (Figura 12).

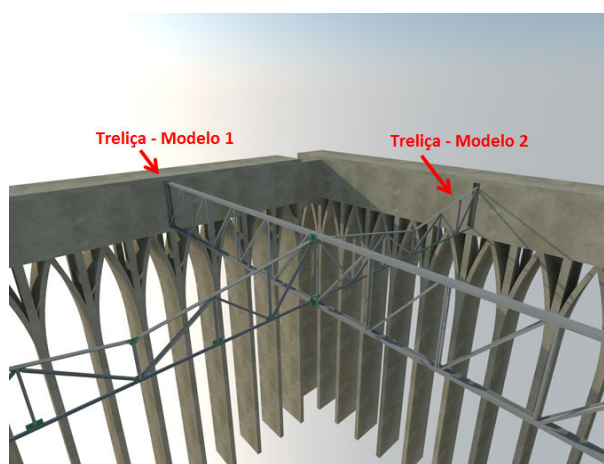


Figura 12: Modelo digital – vista dos dois modelos de treliça. Fonte: acervo particular dos autores.

Apesar do vão interno ser um quadrado de 40 x 40 metros, a treliça modelo 1 atende aos esforços principais, possuindo inércia única (Figura 13 e Figura 14).

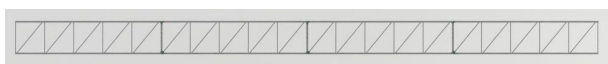


Figura 13: Tipologia da Treliça Modelo 1. Fonte: acervo particular dos autores.

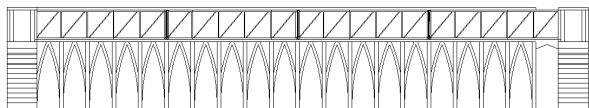


Figura 14: Treliça Modelo 1. Fonte: acervo particular dos autores.

A treliça modelo 2, tem inércia variável para atender a inclinação do forro e das telhas que tem suas calhas posicionadas nas partes mais baixas da mesma (Figura 15 e Figura 16).



Figura 15: Tipologia da Treliça Modelo 2. Fonte: acervo particular dos autores.

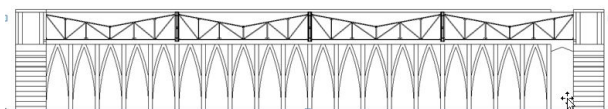


Figura 16: Treliça Modelo 2. Fonte: acervo particular dos autores.

No local, é possível aferir a montagem dos dois modelos de treliças citados conforme exibe a imagem abaixo.



Figura 17: Vista atual do telhado, treliça modelo 1 e treliça modelo 2 cruzadas perpendicularmente. Fonte: acervo particular dos autores.

As ligações foram divididas em dois tipos: soldagem direta sobre placas de ligação e aparafusadas, para atender ao processo de montagem (Figura 18, Figura 19 e Figura 20).



Figura 18: Ligação através de soldagem direta *in loco*. Fonte: acervo particular dos autores.



Figura 19: Ligação através de soldagem direta no modelo virtual. Fonte: acervo particular dos autores.

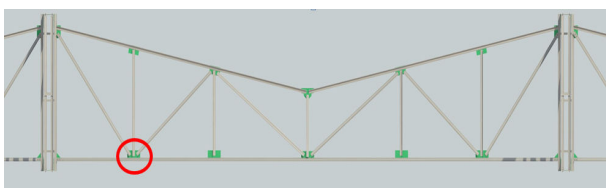


Figura 20: Sequência de análises para modelar a ligação soldada com chama #3/16". Fonte: acervo particular dos autores.

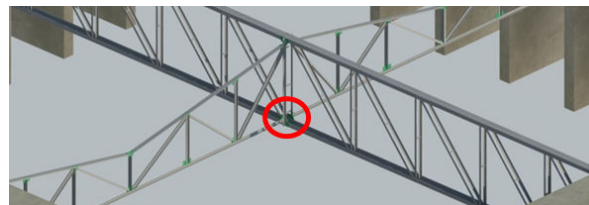


Figura 23: Ligação parafusada com chapa #3/16"-detalhe para os parafusos de 1/2" e 3/8". Fonte: acervo particular dos autores.

As ligações aparafusadas foram utilizadas para facilitar a montagem, e podem ser vistas no modelo digital e na inspeção feita no local (Figura 21, Figura 22, e Figura 23).



Figura 21: Ligação aparafusada *in loco*. Fonte: acervo particular dos autores.

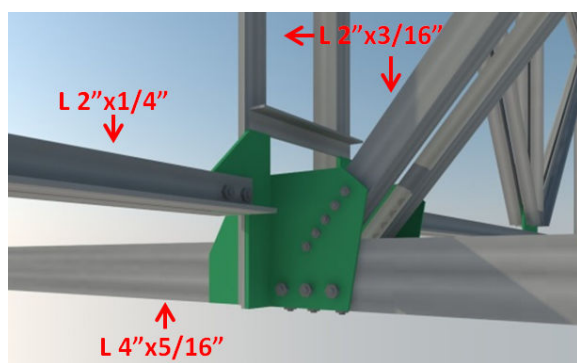


Figura 22: Ligação aparafusada no modelo virtual. Fonte: acervo particular dos autores.

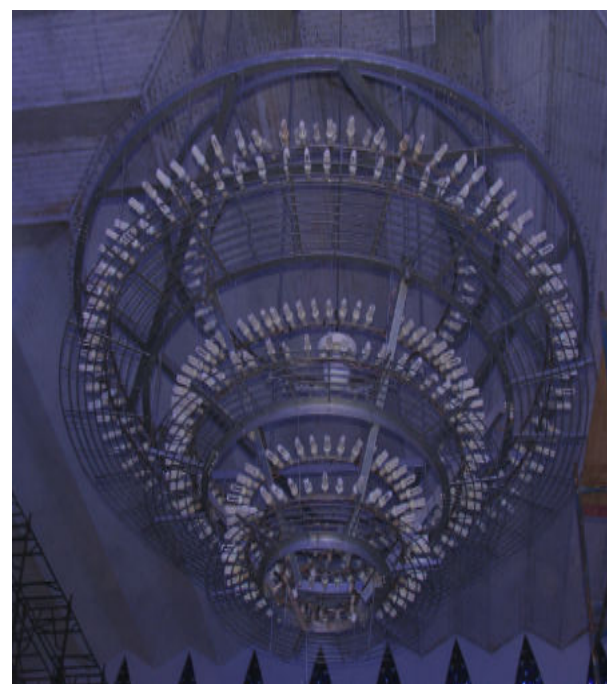


Figura 24: Detalhes da estrutura do lustre. Fonte: acervo do SDB.

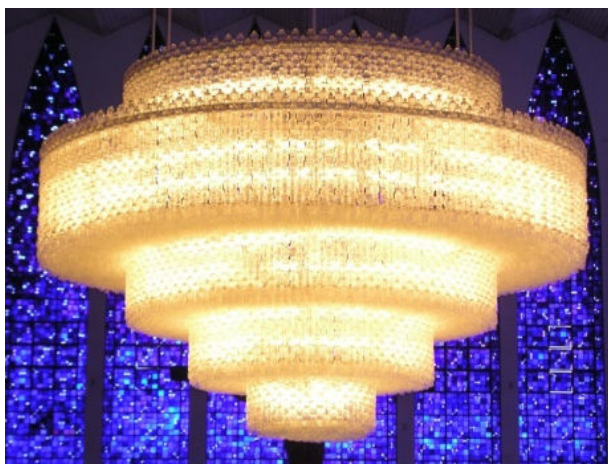


Figura 7: Lustre montado. Fonte: acervo do SDB.



Figura 7: Detalhe do copo de vidro. Fonte: acervo do SDB.

4. Conclusões

As vistorias e medições *in loco*, a análise documental e os modelos físico e computacional não só possibilitaram a recuperação do acervo histórico do Santuário Dom Bosco, como contribuíram para o entendimento do relacionamento entre estrutura e arquitetura em Brasília. O Santuário foi projetado conforme a tradição estabelecida pelos criadores da cidade – planta livre, grandes vãos, arquitetura escultural e estrutura aparente. A solução estrutural, portanto, domina a construção, criando, de certa forma, todos os seus espaços: as fachadas são compostas de

nada mais que pórticos em arcos ogivais de concreto aparente; sua planta, totalmente livre, só é possível por causa das treliças metálicas que, apesar de escondidas, dominam sua forma.

Arquitetonicamente e estruturalmente é um edifício que impressiona por sua grandeza e ao mesmo tempo leveza. Percebe-se ainda, na remontagem do cronograma de etapas e da sequência de execução da obra, que a esta pode ser coordenada de forma simples e eficiente. Seu sistema estrutural é simples, leve e apresenta boa estabilidade estrutural.

O Santuário à primeira vista parece um enorme bloco de concreto. No entanto, internamente ele revela um espaço surpreendente, preenchido pela luz natural que atravessa os vitrais em 12 tonalidades de azul; essa luz ilumina o salão a qualquer hora do dia. Já à noite, o espaço é iluminado por meio do grande lustre central que possui, com 435 lâmpadas.

Pode-se perceber que a estrutura foi pensada não apenas como um sustentador de cargas, mas também como parte funcional e estética do edifício, trazendo o simbolismo de elementos católicos – arquitetura gótica – para o modernismo. Toda solução estrutural exigida para sustentar o vão central pode ser vista como composição rica e detalhada de uma arquitetura moderna. A união dos conhecimentos estéticos aos elementos de sustentação e técnicas de cálculo estrutural possibilitou detalhes minimalistas descrevendo as linhas esbeltas e simples da arquitetura apresentada. Conclui-se, portanto, que o Santuário Dom Bosco pode ser caracterizado como um edifício de estrutura aparente tanto internamente quanto externamente. Seu aspecto estrutural deixa clara a função arquitetônica que traz enriquecimento para o próprio edifício e para o seu entorno.



6. Referências

- [1] Macdonald, A. 2001. *Structure and Architecture*. 2nd ed., Architectural Press, Department of Architecture, University of Edinburgh, Edinburgh.
- [2] Charleson, A. 2009. *A Estrutura Aparente: Em Elemento de Composição em Arquitetura*. Tradução de Alezandre Salvaterra, Bookman, Porto Alegre.
- [3] Nervi, P. 2010. *Costruire Correttamente*. 2a ed., Ulrico Hoepli Editore, Milano.
- [4] Rossetti, E. 2012. *Arquiteturas de Brasília*. Instituto Terceiro Setor, Brasília.
- [5] Niemeyer, O. 1978. *A Forma na Arquitetura*. Editora Revan, Rio de Janeiro.



Encáostica, a Engenharia do Caos

Construindo Sistemas Acadêmicos Dinâmicos

Nilo Sylvio Costa Serpa

GAUGE-F Scientific Researches, Brasil; Faculdades ICESP.

Marcelo Alcântara

Instituto Expert Brasil.

Emilly Moura da Cruz

UNIP- Universidade Paulista.

Received: 02 Oct 2017 / Accepted: 20 Oct 2017 / Published: 27 Nov 2017.

Abstract: The aim of this theoretical study is to present and discuss a chaotic simulation model addressed to understand how an academic environment can evolve from chaos to stabilized states, providing a consistent basis to support new methodological initiatives that promote changes in the current paradigm of education. Simulations are given as representations of academic systems consisting of researchers and professors interacting within a change-resistant environment. Well-defined attractors are found in all simulations.

Key words: computational simulation, modeling, attractor, chaos.

Letras romanas

u , v , w : dissimilaridades dinâmicas da competição entre as forças atuantes no sistema

Letras gregas

α_1 , α_2 : constantes de acoplamento entre as variáveis dinâmicas do sistema

1. Introdução

Desde a década de 1980, os estudos sobre os chamados sistemas caóticos têm se intensificado. Nesta trilha de investigação surgiram trabalhos seminais sobre o assunto, os quais se tornaram verdadeiros clássicos nas literaturas científicas — básicas e avançadas — como os de Gleick [4], Kauffman [6] e Prigogine [12] [13]. Mais recentemente, pesquisadores de vários campos se ocuparam da ciência do caos em contextos que vão desde a educação, passando pela gestão de recursos humanos, economia e econofísica, biologia e, finalmente, chegando à física [2] [5] [11] [13] [14] [15] [17]. A célebre simulação do sistema dinâmico de

Corresponding author: Nilo Sylvio Costa Serpa, Ph.D., professor, áreas de pesquisa: gravitação quântica, computação quântica, cosmologia e engenharia de sistemas termodinâmicos. E-mail: nilo.serpa@icesp.edu.br.

Lorenz [9], descrevendo o movimento de um fluido em uma camada horizontal que está sendo aquecida de baixo, foi, sem dúvida, um dos grandes ícones da motivação que tem originado tantos estudos sobre o assunto (Figura 2). Semelhante interesse é justificado pelo simples fato de que é da própria natureza das coisas oscilar entre períodos de grande turbulência e de estabilidade relativa. É, portanto, necessário conhecer as leis do caos, a fim de lidar de forma teleológica e eficiente com nossos sistemas de produção a taxas mais baixas de geração de entropia. Surge, assim, a engenharia do caos.

Encáustica, a engenharia do caos (não confundir com encáustica, técnica de pintura), é uma tecnologia que se vale da ciência do caos para examinar sistemas caóticos, naturais ou artificiais, e construir, a partir de simulações e experimentos sobre estes sistemas, configurações que se mostrem úteis do ponto de vista produtivo por meio de teorias e práticas de controle sobre a dinâmica daqueles sistemas. Trata-se de uma proposta iniciada e cunhada por Serpa, estimulada pelos estudos de Alcântara e desenvolvida graças ao apoio de Moura da Cruz, que ora passam a discuti-la com vistas à preparação de um sistema acadêmico dinâmico capaz de operar eficazmente conforme metodologias disruptivas de ensino/aprendizagem.

Tanto quanto sabemos pela investigação conduzida, não há referências à aplicação da teoria do caos em um sistema como o que está sendo definido aqui. Assim, nossa pesquisa baseia-se em dois pilares fundamentais: organização sistêmica e desdobramento caótico. Buscando uma nova maneira de ver o mundo, alguns autores começaram a propor teorias mais integrativas: o todo é mais do que a soma das partes. Longe de ser uma proposta mística, esta visão se baseia no fato de que as propriedades que um nível organizacional apresenta não são apenas a soma das propriedades de suas partes constituintes, mas são devidas aos processos de interação que ocorrem entre essas partes constituintes. A esse fenômeno chamamos << emergência >> [7]. Assim, organização sistêmica é

um arranjo de atores, ferramentas, processos, conceitos e práticas, de modo que haja lugar para ocorrer << emergência >>. À medida que um novo nível emerge, descobre-se algo ainda mais interessante: o sistema não precisa de estímulo externo para se estabilizar. Isso ocorre a partir das suas próprias características e das possibilidades de interações aleatórias: temos então auto-organização. Dessa forma, desdobramento caótico é uma difusão de eventos aleatórios interligados que desencadeiam mecanismos internos de adaptação e regulação a partir de suas interações. Visto sob esta ótica, o sistema obedece a uma ordem interna, que permite a criação de novas estruturas e novas formas de comportamento. Este fenômeno é relatado por vários autores, dentre eles Gell-Mann [3], Kauffman [6] e Lewin [7]. Não há necessidade de um mecanismo organizacional externo. O sistema, como nós dissemos, se auto-organiza.

Como se depreende, os pilares essenciais descritos acima estão centrados em emergência e aleatoriedade. Agora bem, a educação clássica há muito tempo se firmou a partir de uma perspectiva autoritária, decorrente de séculos de tradição. O modelo de ensino centrado no professor, com o preceptor como detentor do conhecimento e, portanto, responsável por transmiti-lo aos alunos, permaneceu predominante, apesar dos esforços sempre presentes dos educadores para mudar essa imagem. À guisa de exemplo, como relatado por Mamede e Penaforte, nós podemos mencionar John Dewey, quem já em 1903 afirmava que

"A crença de que uma teoria pode ser aprendida a partir de uma fórmula verbal nasceu da concepção de que primeiro percebemos coisas e idéias, como se fossem objetos de conhecimento separados para serem vinculados pela função do julgamento. Desta forma, a educação se torna sinônimo de transmissão de fatos externos à mente, na perspectiva de que, em uma segunda etapa, como resultado de uma propriedade natural do processo de conhecimento, a descoberta de

suas conexões associativas irá necessariamente seguir” [10].

Diante dos fatos, acreditamos que é possível construir um novo modelo de ensino-aprendizagem a partir de concepções pouco ortodoxas centradas no caos e na auto-organização. A presente abordagem visa mostrar como um ambiente acadêmico pode se auto-organizar a partir do caos e evoluir por meio da aplicação de princípios contidos nas metodologias ativas para o incitamento de interações colaborativas entre professores e pesquisadores. Evidentemente, as simulações começam a partir da premissa de aleatoriedade das propriedades relevantes do sistema em foco, tais como resistência das instituições às mudanças, habilidades individuais e obstáculos burocráticos. Na verdade, essa aleatoriedade é a essência dos modelos mais inovadores e disruptivos de interação humana, nos quais o redesenho de desafios e problemas decorre naturalmente de interações fortuitas entre atores que manifestam seus próprios ritmos de trabalho e também aprendem com outros em grupos e projetos. Espera-se que o presente trabalho lance nova luz sobre os fundamentos teóricos das principais iniciativas contemporâneas para a adequação do processo de ensino-aprendizagem às grandes mudanças da nossa sociedade.

2. Metodologia

Este estudo se baseia na configuração de um <<modelo de brinquedo>> por meio de simulações computacionais realizadas em um ambiente acadêmico aleatoriamente construído. O próximo passo será aplicar o modelo aos perfis profissionais criados nas Faculdades ICESP, Brasília, Brasil. Se os resultados das simulações com os dados levantados forem promissores em relação às novas práticas adotadas na instituição, haverá uma forte indicação de que a teoria pode ser generalizada para qualquer ambiente acadêmico.

Para discutirmos a maneira pela qual é possível instituir, dentro da comunidade acadêmica, um processo comunicacional dinâmico com progresso¹, isto é, que modifica positiva e gradualmente a cultura anacrônica de ensino/aprendizagem hoje vigente na grande maioria — se não na totalidade — das instituições brasileiras de ensino superior, faz-se necessário estabelecer as bases formais que consubstanciam a modelagem da proposta em foco. Começamos por lembrar que, embora evolução implique necessariamente em auto-organização, esta por si só não é suficiente para constituir evolução. Entenderemos melhor isto mais adiante.

De início, consideremos por hipótese um sistema formado hierarquicamente pela classe de professores de uma instituição de ensino superior. Esta hierarquia não reflete uma organização de poder; antes sim, é referida a postos de atuação, tais como líder de grupo de pesquisa, orientador de trabalho de conclusão de curso, orientador de iniciação científica, etc. Obviamente, presume-se que, por se tratar de um sistema, a classe como um todo realiza coisas irrealizáveis para os elementos isolados constituintes do sistema. Este sistema complexo (mas não complicado) é de fato uma rede de atores individuais cujas interações mútuas tendem a produzir um comportamento autogerenciado, muito organizado e cooperativo. Demais disto, tanto quanto seus componentes, o sistema só poderá ser observado mediante uma sucessão de estados caracterizados a partir da definição de certas variáveis que permitem conhecer as simetrias do sistema. Assim, a função de estado que descreveria um membro x (professor) da classe X (sistema) seria escrita como

$$\{\Gamma(X), \Gamma(X, x)\},$$

¹ O conceito de evolução com progresso foi bem discutido por Lewis na década de 1960 [8]. É a noção de evolução contínua, ou seja, não existe um estado de especialização máxima que torne o sistema incapaz de se adaptar e se ajustar a novas condições.

sendo $\Gamma(X)$ a função de estado global e $\Gamma(X, x)$ a função de estado dos membros. Uma vez que os $\Gamma(X, x)$ estão em $\Gamma(X)$, estes objetos não comutam, o que significa que habitam espaços funcionais diferentes. Suas assinaturas, ou conjuntos de coordenadas associadas a eles, formam uma rede hierárquica. Cada nível da hierarquia está descrito pela estrutura

$$\mathcal{M} = \langle \ell, \beta^\ell, T^{\beta^\ell} \rangle,$$

em que

$\ell \rightarrow$ assinatura de escala,

$\beta^\ell \rightarrow$ grupo de simetria na escala ℓ ,

$T^{\beta^\ell} \rightarrow$ uma topologia em β^ℓ (basicamente, as coordenadas no ℓ -ésimo nível).

Se usarmos um espaço de Hilbert $\mathcal{H}$ para descrever estes estados hierárquicos,

$$\Gamma_1, \Gamma_2 \in \mathcal{H}; \alpha, \beta \in R \Rightarrow \alpha \Gamma_1 + \beta \Gamma_2 \in \mathcal{H},$$

teremos para o estado geral,

$$\alpha \Gamma(X) = \left\{ \alpha \gamma_X^{\ell_1}(\tau^{\beta^{\ell_1}}), \right. \\ \left. \left\{ \alpha \gamma_{Xx_1}^{\ell_2}(\tau_1^{\beta^{\ell_2}}), \dots, \alpha \gamma_{Xx_n}^{\ell_2}(\tau_n^{\beta^{\ell_2}}) \right\}, \dots \right\}.$$

O formalismo apresentado acima é derivado de um trabalho de Altaisky em mecânica quântica [1], retomado e expandido por Serpa em computação quântica [16], e agora adaptado para o presente contexto². Para caracterizar o estado fundamental do sistema ora em conjectura e de seus elementos foram estabelecidas *strings* (ou *words*) de sub-variáveis binárias (seis ao todo), cujas <<casas>> (endereços dentro das *strings*) recebem 0, se variáveis recessivas, ou 1, se variáveis dominantes, de acordo com as chamadas <<seis idades>>, a saber:

- Interatividade – capacidade de interação dos elementos entre si, ou do sistema com outros sistemas;
- Iteratividade – capacidade para replicação de processos e ações;
- Interoperabilidade – capacidade de operacionalizar, a partir de interações, procedimentos e atividades concomitantes referentes a um mesmo contexto;
- Constructibilidade – capacidade para desenvolver construtos;
- Intelectividade – capacidade de tornar inteligíveis idéias e conceitos;
- Transdisciplinaridade – capacidade para ultrapassar os limites disciplinares, combinando conhecimentos de áreas diversas.

As letras usadas como identificadores dos itens serão evocadas mais adiante. Cada membro x (professor) é titulado com uma *string* ordenada, um vetor linha cuja ordem dos <<bits>> é a ordem apresentada acima, sendo que o estado de cada membro hierarquicamente incluído no sistema não pode ser avaliado independentemente dos níveis acima de seu próprio nível, nem do estado dos membros conivados.

A ordem apresentada acima não é gratuita. A intelectividade, por exemplo, só será plenamente desenvolvida se houver destreza na elaboração e na associação de construtos. Por sua vez, a transdisciplinaridade só pode ser alcançada a partir das habilidades intelectivas, as quais aguçam a percepção das inter-relações disciplinares. Nada disso seria factível não houvesse antes a experiência interativa necessária ao desenvolvimento da retórica, nem a experiência da reprodução de vivências sociais agregadoras a partir do domínio da retórica, nem a experiência de testar idéias por interoperabilidade de

² Espaços de Hilbert são construtos aplicados com grande sucesso na mecânica quântica, embora seu âmbito de aplicação não se restrinja a esta área (nota dos autores).

processos comunicacionais e técnicas de atuação coletiva, cujos resultados certamente fomentam a trama de construtos. Partiu-se do princípio de que todo indivíduo tem essas potencialidades, algumas dominantes, outras recessivas.

Já que seria pretensioso e arriscado afirmar que as <<seis idades>> formam um conjunto imutável, introduzimos este conjunto como designativo de um estado fundamental comum a todos. Diz-se, então, que ocorre evolução individual se uma propriedade nova emerge a partir do estado fundamental (formado pelas <<seis idades>>). Esta nova <<idade>> acrescenta um <<bit>> à *string* original, 0 ou 1 (os <<*monomers*>> de Kauffman [6]), dependendo das interações entre os elementos da classe. Se, por seleção espontânea, a nova propriedade agregar valor ao sistema, tornando sua dinâmica mais eficaz, diz-se que houve evolução do sistema com progresso. Teoricamente, *strings* podem crescer indefinidamente, sendo que para um determinado comprimento L da *string* haverá 2^L tipos de *words* possíveis. Assim, as possíveis *strings* binárias de comprimento 2 são

$$A := \{01\}; B := \{11\}; C := \{00\}; D := \{10\}.$$

2.1. Topologia de gramáticas genéticas semi-randômicas

Mantenhamos, pois, o foco nas <<seis idades>> propostas. Um coletivo de *strings* permite estabelecer pares de *words* que podem ser recombinadas segundo regras previamente estabelecidas. Dá-se o nome de gramática ao conjunto de tais regras. Sendo tais regras similares às regras de recombinação cromossomal, dizemo-las <<genéticas>>. Gramáticas são especialmente úteis quando se deseja testar se um modelo distante da condição de equilíbrio é conduzido, à beira do caos, a processos de auto-organização, verificando se a dinâmica do sistema em questão manifesta um estado atrator, isto é, um estado de convergência, o qual desponta de uma trajetória que parece fazer mais sentido que outras, ou que ocorre com maior frequência durante as iterações. Uma vez

que a *word* de um novo elemento do sistema é constituída de uma seqüência arbitrária de zeros e uns, de acordo com a ordem proposta das <<idades>> podemos escolher um ponto de corte fixo nas *strings*, visto que os três primeiros bits se referem às propriedades que caracterizam os requisitos de atuação individual menos complexos — as capacidades de exercer ação mútua, repetir e por em prática os processos desenhados para o sistema —, e os três últimos às capacidades individuais superiores — aptidão para criar e aplicar novos construtos, usando-os como conectores entre diferentes áreas —, as quais se supõe menos freqüentes. Por esta razão, qual seja a de fixar um ponto de corte numa *string* aleatoriamente construída, é que demos o nome de gramática semi-randômica. Sejam, portanto, dois elementos com os seguintes rótulos:

$$\{001|011\}, \{111|010\}.$$

De acordo com a gramática em aplicação temos as recombinações

$$\{111|011\}, \{001|010\}.$$

Recombinações deste tipo são resultados de interações aleatórias. Outrossim, podem ocorrer mutações aleatórias em determinados *bits* provocadas por estímulos e motivações emergentes da própria dinâmica do sistema; noutras palavras, são ajustes de comportamentos em função dos *feedbacks* providos pelo próprio ambiente.

Consideremos agora uma topologia para as nossas *strings*, isto é, uma estrutura que permanece inalterada diante da mudança cardinal aleatória dos *bits*. Retomemos as letras identificadoras das <<seis idades>>, conservando-as na mesma ordem em que foram listadas. Dessa forma, nossa *string* completa poderia ser escrita de modo literal como

$$\{a, b, c, d, e, f\}.$$

Sendo esta *word* uma topologia, se tomarmos todos os seus subsets (abertos) ordenados de acordo com a seqüência original de letras — nos quais se omitem os itens recessivos —, poderemos estabelecer o seguinte *lattice*³ (Figura 1):

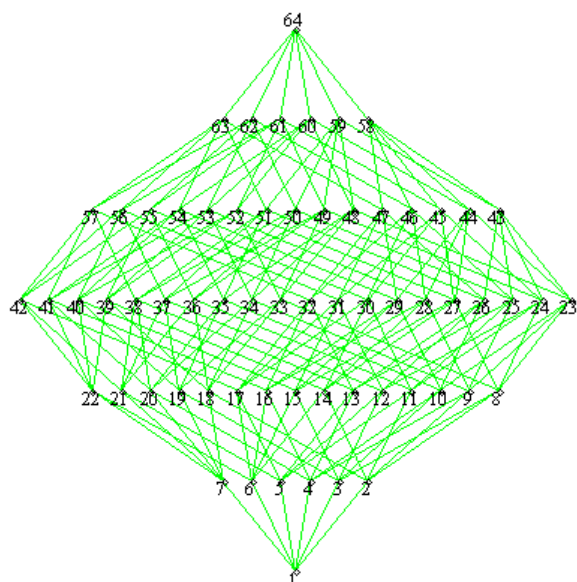


Figura 1 – *Lattice* da topologia definida no modelo.

Portanto, o número de abertos desta topologia equivale aos 2^L tipos de *words* possíveis já mencionados, a saber, 64. Dessarte, uma evolução individual, no sentido estrito apontado anteriormente, levará a uma mudança de topologia.

2.2. Buscando atratores no modelo

Kauffman define atrator como um conjunto de pontos, ou estados num espaço de configuração, para o qual as trajetórias dentro de determinados limites deste espaço convergem assintoticamente com o passar do tempo [6]. Sendo assim, fixada a topologia descrita na subseção anterior, a idéia principal é agora simular um

³ Em topologia, ou, mais especificamente, teoria da ordem, um *lattice* ou retículo é um conjunto parcialmente ordenado com a propriedade fundamental de que dado um par de elementos somente poderá haver um único extremo superior e um único extremo inferior. (nota dos autores).

modelo caótico de SAD (abreviatura para Sistema Acadêmico Dinâmico) a partir das trocas e *feedbacks* entre professores de um meio acadêmico qualquer, verificando se ao final de um grande número de iterações se observa um comportamento predominante, isto é, se a dinâmica do sistema conduz, com o tempo, a estados organizados em torno de uma fronteira de estabilidade, um atrator (a linha ou faixa que delimita a fronteira de um atrator é denominada <<caóstica>>). Para tanto é necessário estabelecer três equações diferenciais, a saber:

1. Equação diferencial do perfil acadêmico, subentendendo-se que este pode evoluir continuamente;
2. Equação diferencial da ação do meio acadêmico sobre o perfil acadêmico acima mencionado, admitindo-se que tal ação se modifica continuamente;
3. Equação diferencial da propensão individual, supondo-a também continuamente mutável.

As oscilações que caracterizam a evolução do sistema são referentes às flutuações competitivas reais entre as forças atuantes (resumidamente, resistência a mudanças *versus* motivações inovadoras, tendo como *background* um acervo de habilidades individuais). Esta dinâmica foi representada por um sistema do tipo Lotka-Volterra modificado por Serpa,

$$\begin{cases} a.u.u_o - \alpha_1.u.u_o.v.v_o = 0 \\ -b.v.v_o + \alpha_1.u.u_o.v.v_o - \\ -\alpha_2.v.v_o.w.w_o = 0 \\ -c.(w.w_o - w_o^\dagger) + \alpha_2.v.v_o.w.w_o = 0, \end{cases}$$

no qual a mescla das variáveis dinâmicas u, v, w com u_o, v_o, w_o encerra dissimilaridades e determina, com o tempo, a configuração final do sistema de acordo com

os dados registrados (para maiores detalhes sobre esta forma de modelagem, favor consultar a referência [15]).

3. Resultados e discussão

As primeiras simulações partiram da geração aleatória de 10 strings binárias das <<seis idades>>, das dissimilaridades entre as ações do meio acadêmico (computadas em termos de probabilidades) e das dissimilaridades entre as propensões individuais (que também são probabilísticas) para um total de 40 perfis acadêmicos aleatoriamente escolhidos entre as 10 strings (isto significa que há perfis repetidos). Os atratores mudam no espaço de configuração de acordo com o número de membros considerados (embora este não seja marcante para a forma da evolução), com a variabilidade das propensões individuais e com a variabilidade da resistência institucional às mudanças. De um modo geral, a presença de propensões individuais elevadas contra a ocorrência de acentuada resistência a mudanças resulta em atratores em torno de áreas bem definidas e estreitas (Figuras 3 e 4). Em termos de largura de faixas de dissimilaridades, o que se observa amiúde é que, consideradas as dissimilaridades entre as propensões individuais numa faixa mais larga de valores, o sistema tende a convergir para uma cáostica menor em torno de marcas mais elevadas no eixo das ordenadas (dissimilaridades no meio acadêmico), enquanto que para dissimilaridades entre as propensões individuais numa faixa mais estreita o sistema tende a convergir para uma cáostica maior em torno de marcas mais baixas no eixo das ordenadas (arrastando as dissimilaridades no meio acadêmico para valores menores).

Por definição, quanto mais estreita a cáostica, maior a simetria entre os componentes do sistema. A pergunta é: que perfis são necessários para que se obtenha um atrator que reflita esta simetria, isto é, o estado auto-organizado que buscamos, no qual as três grandes

variáveis dinâmicas se estabilizam? Repetidas simulações sob as mais diversas hipóteses iniciais, inclusive diferentes intervalos de tempo de processamento, mostraram que, para um total de 40 membros, a configuração ideal do conjunto exige de 9 a 10 membros com perfis entre 57 e 63 (em ordem, strings 111001, 111010, 111011, 111100, 111101, 111110, 111111), sendo pelo menos um com perfil máximo dominante 63 (Figura 5). Observe que em todos esses perfis, no mínimo um *bit* das <<três idades superiores>> é dominante, e todos das <<três idades inferiores>> são dominantes. Por configuração ideal de equilíbrio se entende aquela que exhibe um atrator bem localizado, caracterizado a partir do fato de serem pequenas as dissimilaridades e suas diferenças.

Conclusão

Este estudo mostrou simulações realizadas em representações de sistemas acadêmicos formados por pesquisadores e professores que interagem em um ambiente supostamente resistente a mudanças, ressaltando que estes sistemas, denominados SAD, podem evoluir de configurações caóticas para a estabilidade, induzindo atratores bem definidos. Presume-se que a estabilidade é um novo estado de ordem alcançado pela troca contínua de conhecimento e experiências entre os atores, de tal forma que se tornou possível mudar os processos internos de ensino e avaliação, agregando mais valor à aprendizagem e mais qualidade ao ensino. Certamente, é um modelo teórico que precisa ser confrontado com a realidade através de instrumentos práticos de coleta de dados. As atividades que promovam a interação devem ser organizadas para permitir observações precisas da evolução do SAD. As principais implicações práticas esperadas deste estudo são a modernização dos processos acadêmicos, tanto administrativos quanto de ensino / aprendizagem, e a melhoria da qualidade do ensino, uma vez que o funcionamento do modelo apresentado depende de mudanças institucionais

profundas. Além disso, os trabalhos futuros podem realizar análises estocásticas complementares ao assumir os processos de Markov sobre o número finito de possíveis estados individuais.

- [17] Wheatley, M. 2012. *Liderança e a Nova Ciência: Descobrendo Ordem num Mundo Caótico*. Cultrix, São Paulo.

Referências

- [1] Altaisky, M. 2000. “What Can Biology Bestow to Quantum Mechanics?” *arXiv: quant-ph/0007023v1*.
- [2] Din, Q. 2017. “Complexity and Chaos Control in a Discrete-Time Prey-Predator Model.” *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat* 49: 113–134.
- [3] Gell-Mann, M. 1996. *O Quark e o Jaguar: As Aventuras no Simples e no Complexo*. Rocco, Rio de Janeiro.
- [4] Gleick, J. 1991. *La Théorie du Chaos*. Flammarion, Paris.
- [5] Haefner, J. 1996. *Modeling Biological Systems: Principles and Applications*. Chapman & Hall, New York.
- [6] Kauffman, S. 1993. *The Origins of Order*. Oxford University Press, New York.
- [7] Lewin, R. 1994. *Complexidade: A Vida no Limite do Caos*. Rocco, Rio de Janeiro.
- [8] Lewis J. 1972. *O Homem e a Evolução*. Paz e Terra, Rio de Janeiro.
- [9] Lorenz E. 1993. *A Essência do Caos*. Editora Universidade de Brasília, Brasília.
- [10] Mamede, S., Penaforte, J. (orgs) 2001. *Aprendizagem Baseada em Problemas: Anatomia de uma Nova Abordagem Educacional*. Hucitec, Fortaleza.
- [11] Mitchell, M. 2009. *Complexity: A Guided Tour*. Oxford University Press, New York.
- [12] Prigogine, I. 1980. *From Being to Becoming: Time and Complexity in the Physical Sciences*. W. H. Freeman and Company, New York.
- [13] Prigogine, I. 2002. *As Leis do Caos*. Editora UNESP, São Paulo.
- [14] Šarlošia, J., Bockob, J., Suroveca, R. 2014. “Deterministic Chaos.” *Procedia Engineering* 96: 458 – 466.
- [15] Serpa, N. 2012. “Computational Simulations and Science: Advanced Lotka-Volterra Modeling in Economics.” *Int. J. of Data Analysis & Information Systems* 4(2): 69 - 80.
- [16] Serpa, N. 2017-2018. “Clouds of Quantum Machines.” *Encyclopedia of Information Science and Technology* 4th ed. 91: 1040-1062.

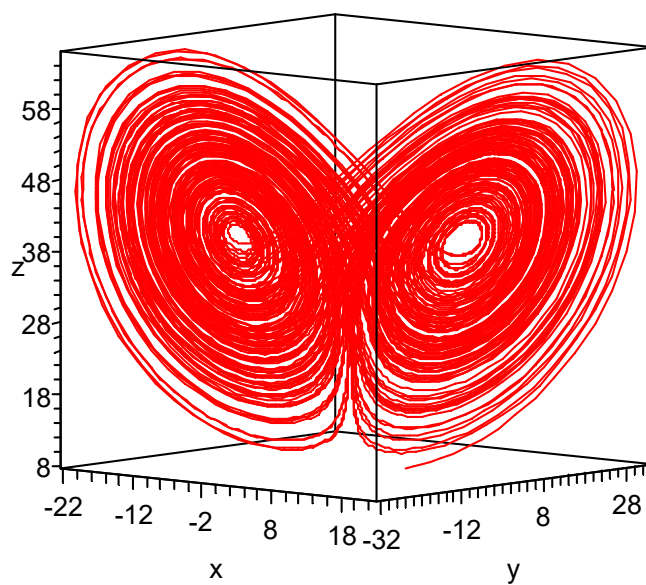


Figura 2 – O famoso ciclo de Lorenz construído em Maple.

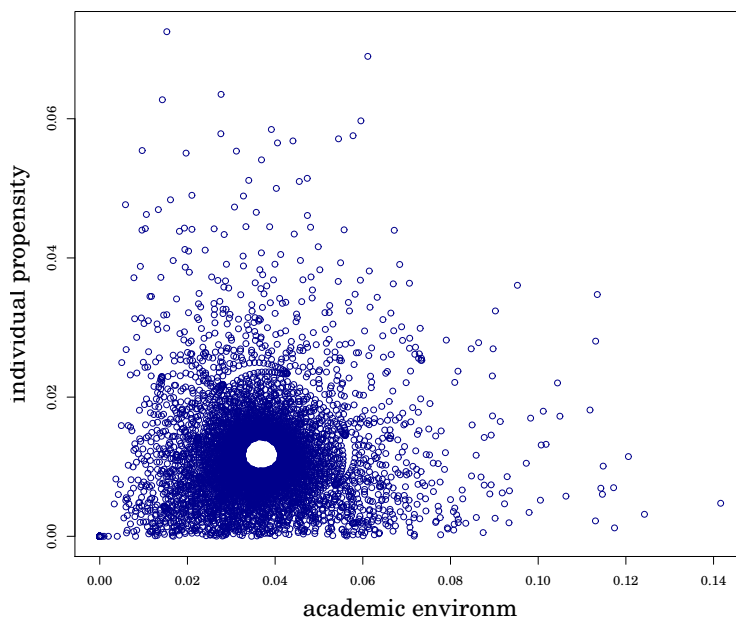


Figura 3 – Atrator para uma faixa mais larga de propensões individuais.

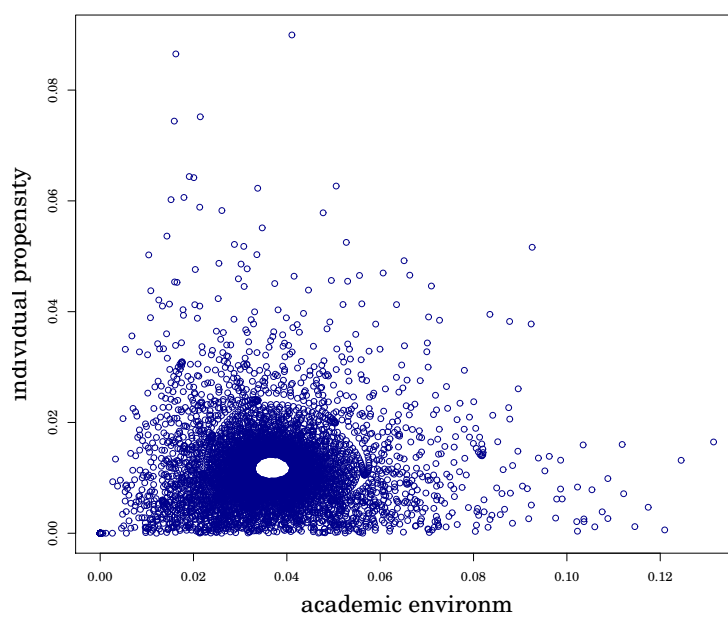


Figura 4 – Variação do atrator da figura anterior para uma faixa mais larga de propensões individuais.

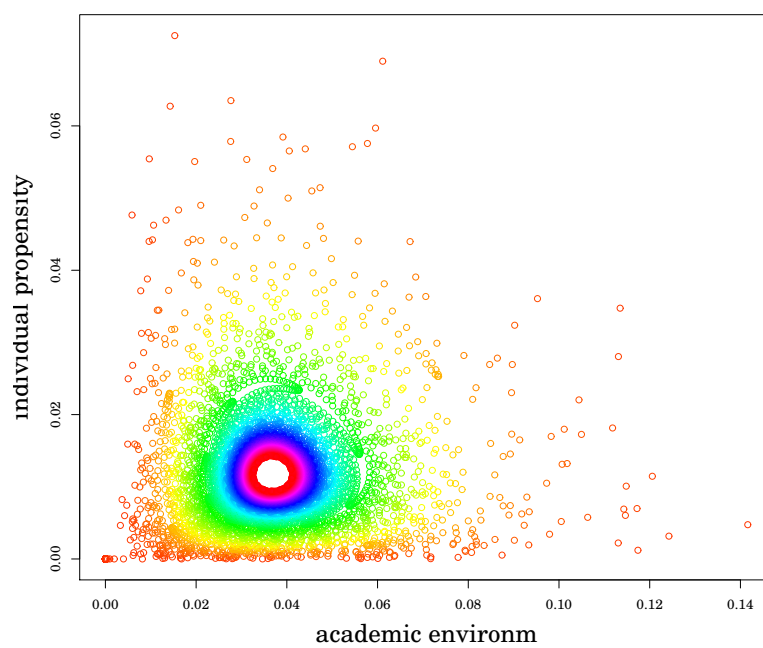


Figura 5. Cáostica (em vermelho) de uma evolução ideal para um sistema com 40 membros, contendo um perfil 63 e oito perfis entre 57 e 62.



Théorie Quantique de l'Espace-Temps:

Principes Physiques et Philosophiques

Nilo Sylvio Costa Serpa

GAUGE-F Scientific Researches, Brazil; Faculdades ICESP.

Received: 12 Sept 2017 / Accepted: 20 Oct 2017 / Published: 27 Nov 2017

Résumé: Cet article présente et discute, d'un point de vue épistémologique, une théorie quantique de l'espace-temps basée sur des principes formés à partir de la mathématique infinie appliquée à la philosophie naturelle, de la cosmologie et de la géométrie riemannienne. Une argumentation prudente montre qu'il n'y a aucune raison logique de supposer que la structure ultime de l'univers est discontinue, à partir du moment où l'on considère un univers en expansion. La relativité générale et la mécanique quantique sont évoquées en discutant des barrières qui entravent aujourd'hui une théorie de grande unification. Une brève explication de la géométrie de Lyra est faite sous l'application des fonctions de singularité dans le contexte de la théorie proposée. De plus, une appréciation de l'état actuel des investigations est faite, montrant le rôle de la théorie en cause dans le scénario de la recherche moderne.

Mots clés : fonction de singularité, géométrie de Lyra, échelle de Planck, géométrie de Riemann, relativité générale, mécanique quantique.

Lettres grecques

χ : fonction de jauge de Lyra

$\Gamma_{\mu\sigma}^{\alpha}$: connexion de Levi-Civita-Christoffel

ϕ_{σ} : champ vectoriel de déplacement

$g_{\mu\sigma}$: tenseur métrique

1. Introduction

Dans cet ouvrage, un effort de réflexion philosophique se manifeste à l'élimination des obstacles qui ralentissent les progrès de la physique moderne, effort qui s'inspire d'ouvrages antérieurs comme ceux de Butterfield et Isham [1].

Après tant d'années de recherche en gravitation, je me retrouve à travailler sur différentes lignes théoriques dans une sorte d'exemption de choix, ne développant que des théories qui portent en elles des promesses d'élucidation. Je ne les vois pas comme des

Corresponding author: Nilo Sylvio Costa Serpa, Ph.D., professor, research fields: quantum gravity, quantum computing, cosmology and thermal systems engineering. E-mail: niloserpa@gmail.com.

théories concurrentes, mais comme des systèmes de représentation qui peuvent être complémentaires dans un certain sens. Dans l'état actuel de connaissance, je ne peux pas affirmer cette complémentarité, mais je crois que ce sera le cas à l'avenir. Je ne souhaite pas ici discuter des modèles de gravitation existants, mais clarifier le modèle principal que je propose pour ce que nous appellerions, faute de meilleure expression, la «gravitation quantique», entendue ici comme une théorie quantique de l'espace-temps. Cette théorie vise à modéliser un seul substratum constituant toute la matière existant sous ses différentes formes. En d'autres termes, la théorie vise à construire un modèle qui permet une compréhension unifiée de ce qui existe au-delà des interactions et des «observateurs». Il ne s'agit donc pas d'une théorie de grande unification, mais d'une théorie phénoménologique générale sur les structures primordiales de l'univers, structures qui imprègnent tout ce qui existe, y compris les particules élémentaires et les quarks.

2. Métaphysique phénoménologique

Un vieux maître m'a dit au lycée: « physique est mathématique plus bon-sens ». C'est, peut-être, une vision simpliste, mais en fait elle semble s'appliquer parfaitement à la question de la définition du quantum spatio-temporel (si cette définition apporte un sens réaliste).

Une autre chose que j'ai apprise est qu'on ne peut jamais abandonner les grands classiques de la littérature scientifique, dans lesquels se trouvent les concepts les plus fondamentaux présentés d'une manière simple et claire. C'est ce qui se passe avec les écrits de Lazare Carnot [2] sur la métaphysique du calcul infinitésimal, dont je me permets ici de retranscrire un premier passage lumineux:

« Il n'est aucune découverte qui ait produit dans les sciences mathématiques une révolution aussi heureuse et aussi prompte

que celle de l'Analyse infinitésimale; aucune n'a fourni des moyens plus simples ni plus efficaces pour pénétrer dans la connaissance des lois de la nature. En décomposant, pour ainsi dire, les corps jusque dans leurs éléments, elle semble en avoir indiqué la structure intérieure et l'organisation; mais, comme tout ce qui est extrême échappe aux sens et à l'imagination, on n'a jamais pu se former qu'une idée imparfaite de ces éléments, espèces d'êtres singuliers, qui tantôt jouent le rôle de véritables quantités, tantôt doivent être traités comme absolument nuls, et semblent, par leurs propriétés équivoques, tenir le milieu entre la grandeur et le zéro, entre l'existence et le néant ».

Notez le lecteur qu'il y a une référence directe à l'étude de la nature des choses. Ce n'est pas une mathématique lâche dans les rêveries abstraites, mais une mathématique appliquée immédiatement à la connaissance du monde des choses extérieures. L'approche mathématique du calcul infinitésimal implique ainsi les idées de mouvement et d'évolution.

En appliquant ce bon-sens dont j'ai parlé auparavant à cette mathématique véritablement physique, il est possible d'imaginer une partie de l'espace-temps qui rétrécit continuellement à une taille aussi petite que l'on veut. Inversement, on peut penser à la même portion en expansion sur une région aussi petite qu'on le veut. Quelle que soit la taille de cette portion, nous pouvons penser qu'elle est encore plus petite à l'infini. Peu importe combien cette partie est agrandie, nous pouvons toujours penser à cela plus petite encore *ad infinitum*. La petitesse de son expansion s'ajoute à un nombre infini d'expansions infiniment petites, de telle sorte qu'une expansion globale observable se produit. Ainsi, ces êtres uniques, les tailles aussi petites que l'on veut, « qui tantôt jouent le rôle de véritables quantités, tantôt doivent être traités comme absolument nuls » apportent dans leur ambiguïté intrinsèque l'essence dynamique du devenir spatio-temporel. Est-ce clair? Pas du tout! Pour moi cela a bien fonctionné, mais nous devons améliorer

notre langage et nos représentations pour arriver à une idée claire pour tous.

3. Le divisible et l'indivisible dans la représentation de l'univers

A ce moment-là, ma théorie de la gravité quantique se sépare de celle préconisée par Rovelli (que j'admire beaucoup) et d'autres, pas de manière contradictoire, mais plutôt sur la façon dont nous comprenons l'essence de l'espace-temps. Pour Rovelli, l'espace ne serait pas continu, c'est-à-dire, divisible en infini, mais composé de minuscules boucles entrelacées les unes avec les autres [4][5][6][7][8]. Pour autant que je sache, la théorie est allée très bien, car elle fournit des indications d'une explication satisfaisante des phénomènes au-delà de l'instant « initial » du univers.

Mais il reste une question qui me semble être à la base de la difficulté de la conciliation entre la mécanique quantique et la relativité générale. Alors que la cosmologie cherche à comprendre la genèse de l'univers, *inter alia*, à partir d'une dynamique d'expansion qui, en principe, n'indique aucun caractère discontinu de l'espace-temps, la mécanique quantique dévoile le caractère discret de la structure microphysique de la matière. À mon avis, cette image discrète est seulement ce qui est capturé à partir des interactions, et Rovelli a raison quand il souligne l'interaction comme concept clé pour la compréhension du monde. Mais quand on parle de la tapisserie ultime de l'univers, du contenu le plus intime de toute matière, ce serait une contradiction philosophique d'établir une matière indivisible, puisque l'indivisible ne consiste pas en parties, et ce qui n'a pas de parties a, théoriquement, la nature d'un point. Mais le point est une pure abstraction mathématique; physiquement, étant donné que la matière est finalement constituée par l'espace-temps lui-même, la manière la plus logique de concevoir la réalité physique est d'imaginer un continuum dynamique (de contraction ou d'expansion),

non le point statique, mais l'infiniment petit en expansion ou en contraction.

Par ailleurs, la notion de frontière du divisible est certainement liée aux limites de l'appréhension expérimentale; déterminer la plus faible valeur détectable d'une quantité ne signifie pas que l'on a atteint la limite de la réalité. Ce serait affirmer un univers anthropique. Il n'y a aucune raison logique pour soutenir cette limitation, bien que l'on puisse restreindre les approches phénoménologiques en maintenant une circonscription plus empirique.

Ainsi, la mécanique quantique — de même que la théorie des champs quantiques et toutes les théories supersymétriques — est une théorie des interactions microphysiques par excellence, et ces interactions passent par le concept primal de force. En relativité générale, il n'y a pas la notion de force, sauf de façon très métaphorique. La « quatrième interaction » est exprimée par des déformations mutuellement provoquées entre les corps massifs dans un continuum d'espace-temps à partir duquel ces corps sont faits; il n'y a pas ce continuum newtonien d'espace-temps qui contient des choses, mais des choses qui sont faites du continuum d'espace-temps. C'est comme si les corps massifs étaient des condensations de ce continuum, ou, si vous préférez, des cloquages dans la tapisserie de l'univers. Les cloquages sont le résultat des infinies expansions et contractions qui se produisent de façon chaotique, chacune se reliant continuellement aux autres. L'effet combiné de ces expansions et contractions s'appelle « gravité ». Par conséquent, le quantum de l'espace-temps est défini par une contraction — ou expansion — de l'espace-temps aussi petit que l'on veut. Ces contractions et expansions forment la dynamique globale de l'univers que nous observons.

4. Les géodésiques de type-temps et l'équation de Friedmann

Bien sûr, nous sommes dans une phase où les expansions sont dominantes à grande échelle. Localement, cependant, nous trouvons ici et là une prédominance des contractions dans les trous noirs et d'autres processus matériels d'effondrement en général. Une théorie quantique de l'espace-temps, par conséquent, doit traiter les incertitudes de l'état des chemins géodésiques aussi petits que vous voulez, ces chemins infinitésimaux étant des expansions ou des contractions de l'espace-temps lui-même.

Les minuscules chemins géodésiques ont été récemment décrites par des fonctions de singularité dans la géométrie de Lyra [9], les quantités infinitésimales étant des différentiels d'intervalles arbitraires de temps et d'espace pris sur les géodésiques. Ces chemins peuvent être type-temps ou type-espace. Il est donc nécessaire de définir une fonction de corrélation basée sur l'incertitude d'état du chemin géodésique (si type-temps ou type-espace). Cela ouvre la porte à l'application de concepts dérivés de la mécanique quantique.

La géométrie de Lyra est une généralisation de la géométrie riemannienne [3], considérée par certains auteurs comme candidat à la modification des modèles cosmologiques contemporains [10]. En introduisant un champ scalaire, c'est-à-dire, une fonction de jauge $\chi(x^k)$, de sorte que la connexion de Levi-Civita-Christoffel est χ -jaugée et ajoutée d'un terme se référant au déplacement vectoriel d'un transport parallèle donné, on obtient la forme générale de la géodésique en géométrie de Lyra, donnée en fonctions de singularité,

$$\chi \frac{d^2 \langle x - \varepsilon \rangle_\alpha}{d\tau^2} + {}^\dagger \Gamma_{\mu\sigma}^\alpha \frac{\chi d \langle x - \varepsilon \rangle_\mu}{d\tau} \frac{\chi d \langle x - \varepsilon \rangle_\sigma}{d\tau} = 0;$$

$$\begin{aligned} & \frac{d^2 \langle x - \varepsilon \rangle_\alpha}{d\tau^2} + \left[\chi^{-1} \Gamma_{\mu\sigma}^\alpha - \frac{1}{2} (\delta_\mu^\alpha \phi_\sigma + \delta_\sigma^\alpha \phi_\mu - g_{\mu\sigma} \phi^\alpha) \right] \\ & \times \frac{d \langle x - \varepsilon \rangle_\mu}{d\tau} \chi \frac{d \langle x - \varepsilon \rangle_\sigma}{d\tau} = 0; \\ & \frac{d^2 \langle x - \varepsilon \rangle_\alpha}{d\tau^2} + \Gamma_{\mu\sigma}^\alpha \frac{d \langle x - \varepsilon \rangle_\mu}{d\tau} \frac{d \langle x - \varepsilon \rangle_\sigma}{d\tau} \\ & - \frac{\chi}{2} (\delta_\mu^\alpha \phi_\sigma + \delta_\sigma^\alpha \phi_\mu - g_{\mu\sigma} \phi^\alpha) \frac{d \langle x - \varepsilon \rangle_\mu}{d\tau} \frac{d \langle x - \varepsilon \rangle_\sigma}{d\tau} = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

L'espace-temps quantique a été comparé avec la métrique quantique riemannienne afin d'obtenir la fonction de corrélation

$$\langle 0 | g_{\mu\sigma} d \langle x - \varepsilon \rangle_\mu d \langle x - \varepsilon \rangle_\sigma | 0 \rangle = -d \langle x - \varepsilon \rangle_0^2, \quad (2)$$

considérant une géodésique de type temporel. Les différences entre *brackets* se réfèrent à des intervalles arbitraires sur les géodésiques. Le lecteur trouvera une explication détaillée dans la référence [9]. Un aspect important de cette théorie est que le choix du type géodésique dépend du choix de las constantes intervalaires de référence par rapport au domaine de las variables indépendants. Par exemple, en utilisant les propriétés des *brackets*, nous pouvons sélectionner un intervalle purement temporel simplement en rendant les coordonnées spatiales de la géodésique inférieures aux valeurs des constantes intervalaires de référence, qui expriment des trames géodésiques fixes.

De ce qui a été expliqué ci-dessus, l'applicabilité de certaines techniques opératoires stochastiques de la mécanique quantique sur le formalisme de la relativité générale semble rester réalisable. Bien sûr, les autres considérations formelles de la relativité générale sont valables ici. En particulier, adoptant les hypothèses habituelles d'homogénéité et d'isotropie, l'équation de

Friedmann restreinte à la coordonnée temporelle devient

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \left\langle \rho_{\langle t-\varepsilon \rangle_0} \right\rangle \left(1 - \frac{\left\langle \rho_{\langle t-\varepsilon \rangle_0} \right\rangle}{\rho_{Pl}} \right), \quad (3)$$

où la densité entre *brackets* est une fonction des *brackets* de l'intervalle de temps, et la densité de Planck est

$$\rho_{Pl} \sim 10^{96} \text{ Kg} / \text{m}^3.$$

5. Considérations finales

Comme nous le voyons, si cette argumentation dialectique prévaut, la trajectoire de la quantization de l'espace-temps, et par conséquent de la gravité, se révélera très différent de ce que l'on entend généralement par quantization, bien que certaines techniques fondamentales de la mécanique quantique puissent rester valables.

Pour l'instant, à la lumière des impasses actuelles, je ne vois pas qu'il soit productif d'insister sur une unification complète des deux grandes théories qui ont changé notre vision du cosmos. Nous pouvons penser à une unification partielle des méthodes, mais en gardant toujours à l'esprit les grandes différences architecturales de la relativité générale et de la mécanique quantique. Qui sait devrions-nous être moins prétentieux et plus modestes, en acceptant que certaines limites de la connaissance resteront avec nous pendant longtemps, peut-être pour toujours. Après tout, ce que nous avons sont des bonnes représentations qui fonctionnent très bien, chacune dans son propre domaine.

Cela signifie-t-il que nous devons abandonner le modèle corpusculaire supersymétrique? Pas nécessairement. Les gravitons et les gravitines, s'ils sont confirmés, seraient aussi cloquages de la tapisserie cosmologique et pourraient être utiles comme représentations dans des constructions explicatives

spécifiques. Comme je l'ai dit ailleurs, la question épistémologique qui m'intéresse est de savoir comment parler de supersymétrie en gravité, même s'il n'y a aucune preuve de l'existence de particules comme gravitons et gravitinos. Le moyen le plus efficace que je comprends est d'établir *a priori* que connaître les symétries équivaut à connaître le système. Donc, il est raisonnable de construire les symétries qui doivent régir la gravité, sans tenir compte de sa structure réelle, corpusculaire ou autre quelconque. Ainsi, ce qui importe est la symétrie proposée comme *background* des phénomènes, symétrie qui précède toute matérialisation réel. C'est pourquoi je comprends les théories les plus réussies comme complémentaires, fournissant des explications satisfaisantes dans leurs domaines particuliers.

6. Epilogue

Nous sommes donc arrivés à une position métaphysique bien dans le sens indiqué par Margenau. La méthodologie à laquelle cette métaphysique est résumée nous conduit à une définition dynamique du quantum d'espace-temps. D'une part, nous arrivons à une quantité aussi petite que l'on veut, contractant l'espace-temps à des dimensions arbitrairement infimes; d'autre part, nous arrivons à la même quantité aussi petite que vous voulez, mais maintenant dans une perspective d'expansion arbitrairement minuscule.

Essayons, en guise de conclusion, de tenir ensemble deux vérités :

1)- À ce jour, il n'y a pas une théorie unifiée complète qui englobe à la fois la relativité générale et la mécanique quantique; à quel point nous sommes loin d'une telle théorie nous ne savons pas.

2)- Le fait est que nous ne savons même pas si cette unification sera possible.

La physique contemporaine progresse lentement. Ceci est largement dû à des contraintes technologiques, mais il y a aussi des contraintes de nature conceptuelle et théorique. Selon mon point de vue, l'une des difficultés que la physique est confrontée se réfère à un manque de ressources linguistiques et formelles clairement physiques, ce qui a conduit la recherche en physique théorique de plus en plus à un simple exercice mathématique. Je ne pense pas que ce soit le droit chemin. Si nous ne gardons pas l'accent sur la représentation, l'accent sera mis sur les mathématiques, et non pas sur la représentation qui est, après tout, l'objet du théoricien. En fait, tout au long de ma vie universitaire, j'ai trouvé des collègues qui ont affirmé ne pas avoir vu beaucoup de physique à l'école d'études supérieures en physique pendant qu'ils travaillaient leurs thèses. Voici un sujet pour lequel une intervention philosophique profonde est nécessaire dans le sens de la recherche d'un équilibre entre langage et représentation.

En bref, à moins qu'une autre théorie soit trouvée, radicalement différente de celles que nous avons maintenant, je ne pense pas que la tâche de l'unification soit possible. Et je me réfère ici précisément aux besoins de renouvellement conceptuel, qui ne peuvent être satisfaits que par la volonté tenace de la philosophie des sciences.

References

- [1] Butterfield, J., and Isham, C. 2000. "Spacetime and the Philosophical Challenge of Quantum Gravity." In *Physics Meets Philosophy at the Planck Scale*, Cambridge University Press
- [2] Carnot, L. 1970 (reprint). *Réflexions sur la Méta physique du Calcul Infinitesimal*. Albert Blanchard, Paris.
- [3] Lyra, G. 1951. "Über eine Modifikation der Riemannschen Geometrie." *Mathematische Zeitschrift* 54 (1): 52-64.
- [4] Rovelli, C. 2006. *The Disappearance of Space and Time, the Ontology of Spacetime, Philosophy of Physics*. D. Dieks, (Ed.) Elsevier Science Publishing Co 25.
- [5] Rovelli, C. 2007. *Quantum Gravity, Philosophy of Physics*. J. Butterfield and J. Earman, (Ed.) Elsevier Science Publishing Co 1287.
- [6] Rovelli, C. 2007. "Beyond the Screen of Time." *Nature Physics* 3.
- [7] Rovelli, C. 2011. "Zakopane Lectures on Loop Gravity." arXiv: 1102.3660.
- [8] Rovelli, C. 2012. *Et si Le Temps n'Existait Pas? Un Peu de Science Subversive*. Dunod, Paris.
- [9] Serpa, N., 2016. "A New Approach on Quantum Gravity in Lyra Geometry." *Journal of Physical Science and Application* 6: 1-7.
- [10] Shchigolev, V. 2013. "On Exact Cosmological Models of a Scalar Field in Lyra Geometry." *Universal Journal of Physics and Application* 1(4): 408-413.