

# Uma abordagem epistemológica do ensino de estruturas

Luciano Andreatta Carvalho da Costa

Ms. Eng. Prof. ICET/ICSA - Centro Universitário Feevale

## Resumo

No contexto do estudo de uma disciplina – Sistemas Estruturais –, torna-se imprescindível uma clara definição de epistemologia e sua implicação na definição de concepções pedagógicas. Neste artigo, trabalha-se, inicialmente, sobre conceitos epistemológicos para que, posteriormente, se possa situar uma proposta teórica. Por fim, será feita uma análise do ensino de estruturas a partir de um estudo da evolução dos conceitos ao longo da história, contextualizando cada evolução de paradigma, desde a pré-história europeia, com seus modelos de vigas simplesmente apoiadas, até o estado da arte, baseado no Método dos Elementos Finitos. Assim, será possível identificar a forma como os alunos do curso de arquitetura estarão construindo conceitos relativos à engenharia estrutural.

## Palavras-chave

Engenharia estrutural, ensino de arquitetura e engenharia, epistemologia, construtivismo.

## Abstract

In the study context of a subject – “Sistemas Estruturais” –, it is essential to state a clear definition of epistemology and its implications on the definition of pedagogical conceptions. This paper begins with the study about epistemological concepts so that a theoretical proposal can be pointed out. Then later an analysis of structural engineering education based on the study of the evolution of conceptions along the history will be done. Each change of paradigm will be described, from models of simply supported beams in European prehistory to the state of the art, which is based on Finite Elements model. In this way it will be possible to identify the way in which the students of *Sistemas Estruturais* subject of Architecture college will be constructing concepts regarding structural engineering.

## Key words

Structural engineering, architecture and engineering education, epistemology, constructivism.

# Introdução

Muito se tem constatado a respeito das dificuldades dos alunos de arquitetura no tratamento dos conceitos de engenharia estrutural, especialmente por ser um assunto que difere daqueles tradicionalmente identificados com a Arquitetura, como a Arte e a Expressão Gráfica. Seja pela base lógico-matemática e física ou pelo enfoque, muitas vezes, tecnicista dado pelos professores, o resultado final, muitas vezes, é um sentimento de obrigação por parte dos estudantes das disciplinas que tratam dos sistemas estruturais.

Faremos, então, uma abordagem epistemológica dos conceitos relativos aos modelos estruturais da construção de pontes. Tal abordagem, também histórica, analisará o contexto teórico dos modelos de cada período. Desde pontes que remontam períodos pré-históricos até aquelas de concreto protendido, faremos uma análise de cada inovação proposta, construindo, assim, um quadro teórico baseado na Epistemologia Genética que tem suas origens em Piaget (1966). Essa teoria recorre à gênese dos processos cognitivos, procurando entender o adulto estudando a criança. Segundo Piaget (1990), “a vantagem de um estudo do desenvolvimento dos conhecimentos que remonta às suas raízes ... consiste em fornecer uma resposta à questão mal resolvida da direção dos processos cognitivos iniciais”(p.7). Segundo ele, se não houver esse recurso investigativo à gênese, não restará outra alternativa “senão indagar se toda informação cognitiva emana dos objetos, informando de fora o sujeito, conforme supunha o empirismo tradicional, ou se, pelo contrário, o sujeito está desde o início munido de estruturas endógenas que importará aos objetos, segundo as diversas variedades de apriorismo ou de inatismo.” (p.7). Recorremos à gênese da construção de pontes, procurando entender quais foram os conceitos envolvidos nos primeiros modelos cognitivos propostos.

## Epistemologia: contextos e reflexões

O alcance pedagógico da teoria piagetiana ocorre, principalmente, devido à importância dada ao processo de construção do conhecimento. Reforçando a necessidade de se compreender essa construção, bem como ampliar a abrangência do estudo sobre o conhecimento científico, Franco (1997) propõe que a epistemologia vá além do estudo dos critérios de verdade das ciências:

“Partindo do conhecimento do conhecimento (gnosologia) vai em direção às construções sistemáticas deste conhecimento feitas pelo homem: as ciências” (p. 17).

Piaget (1980) reflete e define com clareza tal conceito e sua relação com a construção do conhecimento científico.

Ao se conceber um projeto de ensino que tenha como objetivo específico questões pedagógicas para a arquitetura, precisaremos de posicionamentos sobre a ciência, a tecnologia, a pedagogia e a engenharia, que necessariamente pertencerão a um único contexto epistemológico.

Por que não focar apenas questões pedagógicas? Ora, o conhecimento está presente apenas na sala de aula? Questões cognitivas estão presentes em qualquer relação entre sujeito e objeto, e a compreensão de como se dá a construção deste conhecimento é uma questão epistemológica. Então, nos restringimos a uma reflexão sobre o conhecimento, esteja ele onde estiver?

Reforça-se o posicionamento de FRANCO (1997), argumentando que a ciência talvez seja a maior expressão do conhecimento construído sistematicamente pela humanidade na sua evolução, de forma que precisa-se entender a construção do conhecimento científico para que efetivamente esteja-se situado na busca de explicações de seus condicionantes. Piaget aumenta o leque de abrangência do conceito:

“Em última análise seremos levados a definir a epistemologia, em segunda aproximação, como o estudo da passagem dos estados de menor conhecimento aos estados de conhecimento mais avançado.” (Piaget, 1980, p.20)

Esta definição faz referência tanto à questões sobre conhecimento quanto a sua sistematização histórica expressa pela ciência. Nas páginas seguintes, o foco será a engenharia estrutural, e será imprescindível uma análise epistemológica para situar o seu estado da arte, relacionando-o com as sucessivas construções realizadas ao longo da história.

A grande questão refere-se à construção de conhecimentos novos. Segundo Piaget (1990), a passagem a um nível cognitivo superior não se realiza num sentido único. O que ocorre é uma

assimilação recíproca, em que o nível superior deriva do inferior através de transformações, não havendo um limite bem definido, e sim um processo de construção gradativo. O nível superior enriquece o inferior, havendo uma nítida integração entre ambos. Por exemplo, a construção da multiplicação na matemática não é, simplesmente, uma nova forma de se operar, e sim um processo que deriva da adição, enriquecendo-a a partir da generalização promovida pela multiplicação. O docente precisa estar sensível a este processo, permitindo ao estudante a passagem para níveis superiores a partir da constante interação com o mundo real.

O que se fará aqui é uma análise da evolução cognitiva dos conhecimentos lógico-matemáticos e físicos e a forma como se construíram os conhecimentos novos no âmbito da evolução histórica dos conceitos da engenharia estrutural. Este é o cerne da Epistemologia Genética, sendo que o objetivo deste artigo é aplicá-la ao ensino de estruturas, podendo-se, então, vislumbrar outras possibilidades de aplicações no ensino de engenharia.

## Postura epistemológica proposta

Este trabalho baseia-se na Epistemologia Genética, que, segundo Becker (1999), trata o conhecimento como algo que “jamais poderá ser entendido como cópia perceptiva do real, muito menos como uma imagem gerada por uma sensação. O conhecimento é sempre resultado de uma construção – no sentido epistemológico...”.

Citando Piaget, Becker (1999) reforça que o conhecimento procede a partir, não do sujeito, nem do objeto, mas da interação entre os dois.

Deve-se tratar o conhecimento constituindo-se a partir de uma espiral ascendente, alimentada por uma constante interação do sujeito com o objeto em estudo. É essa interação que precisa ser analisada e trabalhada, pois são as relações estabelecidas neste processo evolutivo e crescente que desencadearão a construção do conhecimento.

## A importância da análise histórica no ensino de ciências

Conforme foi mencionado anteriormente, a aquisição do conhecimento científico pode ser vista de duas maneiras:

- como um processo de construção histórica do conhecimento;
- como uma (re)construção daquele conceito por parte do sujeito.

A ocorrência de descobertas científicas semelhantes em locais distintos, onde os protagonistas das descobertas simplesmente não se conhecem, não é mera coincidência. O que ocorre nestes casos é uma nova construção a partir de estruturas, anteriormente, construídas pela humanidade. Ambos partem da mesma base e dos mesmos conceitos, fato que é determinante na semelhança da descoberta. PIAGET (1990) descreve esse processo como o construtivismo e a criação de novidades, argumentando que a busca do saber não pode esquecer que o universo jamais está concluído. As descobertas científicas sempre ocorrerão, pois são inerentes à Ciência, e recorrer às origens dessas descobertas torna o cientista apto a promover novas descobertas. Da mesma forma, o professor estará sensível ao surgimento de novos conhecimentos nos estudantes, recorrendo aos seus processos cognitivos iniciais.

Portanto, será feito um breve estudo genético da engenharia estrutural, enfocando os conceitos envolvidos na construção de pontes. Serão considerados os seguintes momentos históricos:

- 1) Pré-história européia;
- 2) Etrúria e Roma;
- 3) Revolução Industrial;
- 4) Primeiras pontes de concreto;
- 5) O estado da arte.

Apesar de muito se argumentar, de forma muitas vezes simplista, que a evolução de todos esses conceitos se deu a partir de tentativa e erro, convém explicitar alguns argumentos.

Em primeiro lugar, pode-se perguntar que fatores influenciam a escolha de determinada

tentativa. Piaget (1966) analisa, minuciosamente, essa questão separando as tentativas em dois casos: dirigido e não sistemático. No primeiro caso, temos uma estrutura anterior que irá nortear a definição da estratégia; enquanto que no segundo, parte-se para uma situação totalmente aleatória. Por exemplo, quando os etruscos e os romanos começaram a utilizar arcos para vencer grandes vãos certamente estavam baseados em seus conhecimentos intuitivos de que a existência de forças horizontais pode oferecer uma resistência à aplicação de uma carga vertical, conforme pode-se verificar na Figura 1.

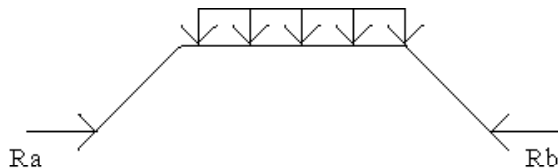


Figura 1 - Modelos Iniciais de arcos.

Ou seja, fizeram uma tentativa dirigida, baseada em conhecimentos anteriores. Uma tentativa não sistemática ocorre em descobertas realizadas de forma aleatória, muitas vezes resultantes de experimentos com objetivos diferentes da descoberta obtida. Kuhn (2001) cita o exemplo da descoberta do oxigênio, obtida a partir de experimentos químicos com objetivos específicos, cuja intenção não era descobrir novas substâncias químicas. Na verdade pode-se dizer que, no contexto da necessidade de um novo paradigma, têm-se muitas vezes uma composição dessas duas situações. Por exemplo, quando se sentiu a necessidade de se vencer vãos maiores, percebeu-se que os materiais tinham que resistir esforços de tração, algo que se observa na natureza. Ou seja, o fato de ter-se optado por materiais resistentes à tração não foi algo essencialmente aleatório, e sim uma nova construção baseada, principalmente, nos conhecimentos lógico-matemáticos e físicos presentes no paradigma anterior, que apresentava apenas materiais resistentes à compressão.

### 1) Pré-história européia

Apesar das limitações tecnológicas presentes na pré-história, obras de engenharia de grande porte já se realizavam. Abaixo está a análise do exemplo da ponte “Tarr Steps”, na Inglaterra, cuja data de execução é desconhecida<sup>1</sup>.



Figura 2 - Ponte “Tarr Steps”, na Inglaterra.

Fonte: Extraído de <http://www.lmc.ep.usp.br/people/otavio/estruturas/pph.htm>

<sup>1</sup> Esta ponte provavelmente foi construída na pré-história (Breve História..., 2002). O fato de não existir uma data precisa não compromete a análise que está sendo feita, pois as próximas pontes apresentadas utilizam conceitos mais elaborados, satisfazendo assim a evolução conceitual pretendida.

No exemplo da Figura 2, observa-se o uso de vigas simplesmente apoiadas como modelo, reforçando as estruturas aditivas e os conceitos físicos de equilíbrio das forças verticais. O obstáculo epistemológico (Dion & Pacca, 1998), ou seja, a resistência conceitual ao longo da história, consistia na consideração de que os materiais resistiam apenas à compressão. Tal paradigma permaneceu ainda no período seguinte.

**ESTRUTURA LÓGICO-MATEMÁTICA E FÍSICA:** Nas grandes obras da antigüidade, trabalha-se, basicamente, com o equilíbrio de forças verticais e com estruturas lógico-matemáticas aditivas.

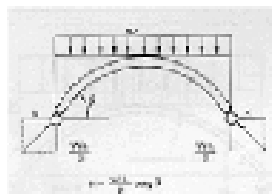
## 2) Etrúria e Roma

A utilização de arcos foi empregada pelos etruscos com bastante propriedade, conforme pode-se constatar na Figura 3, que apresenta uma estrutura construída no século XVIII a. C. A grande novidade foi que os arcos permitiam a utilização de materiais resistentes apenas à compressão. Tal sistema estrutural apresenta conceitos físicos facilmente observáveis, sendo que a solução lógico-matemática possibilita estabelecer uma relação entre a forma do arco e a intensidade das tensões que ocorrem no interior da estrutura. Os romanos também utilizaram arcos nas suas construções, entre elas o Coliseu (ano 70 d. C.), um testemunho do avanço que os romanos trouxeram à engenharia estrutural. Mesmo executando estruturas mais complexas e em período posterior aos etruscos, a utilização de arcos se manteve, justificando a consideração dessas duas civilizações no mesmo contexto teórico.

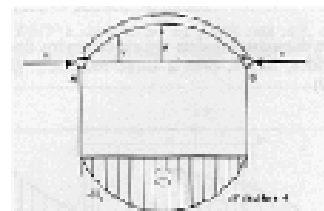


Figura 3 - Ponte du Gard.  
Fonte: Ponte du Gard (2002)

**ESTRUTURA LÓGICO-MATEMÁTICA E FÍSICA:** Seja visto primeiro o modelo físico nas Figura 4 (a) e (b):



(a) carregamento



(b) Momento fletor gerado pelas reações horizontais

Figura 4 - Modelo Teórico dos arcos.

Se o arco é parabólico e a carga é distribuída (Figura 4a), demonstra-se que o momento fletor será nulo, pois o momento gerado pelas reações horizontais (Figura 4b) será exatamente o mesmo gerado pela carga distribuída, porém com o sinal contrário. Desta forma, não se tem também esforço cortante. Isso ocorre sempre que a geometria da estrutura for a mesma que a geometria do diagrama de momento fletor.

### 3) Revolução Industrial

A partir da segunda metade do século XVIII, tornou-se possível a utilização do ferro na construção de pontes. Em 1779, foi construída a Ponte de Coalbrookdale (Figura 5), sendo a primeira ponte de ferro fundido construída em todos os tempos (Breve História..., 2002). A ponte vence um vão de mais de 30 metros.



Figura 5 - Ponte de Coalbrookdale.  
Fonte: Breve História... (2002)

Não se tem neste momento maiores alteração no quadro lógico-matemático. Na verdade, parte-se para a obtenção de novas estruturas ainda baseadas em sistemas de arcos, porém com a flexibilidade que o ferro fundido possibilita. A grande questão desse período consistiu em inovações nos sistemas construtivos, possibilitadas pelas aplicações do recentemente descoberto cálculo infinitesimal<sup>2</sup>. Segundo Timoshenko (1953), passou a ser necessário considerar a complexidade das estruturas reais.

### 4) As primeiras pontes de concreto – o concreto protendido

Neste novo período (primeira metade do século XX), obtém-se uma efetiva contribuição nos modelos matemáticos. Agora, estará presente uma nova estrutura que precisará suportar efeitos combinados de compressão e tração a partir da solicitação de flexão, não havendo necessidade da utilização de arcos para vencer grandes vãos (ver Figura 6). A compreensão da proporcionalidade precisará estar presente, pois um estudo mais aprofundado da resistência dos materiais se faz necessário. Na descrição da estrutura lógico-matemática deste período histórico será citado o exemplo de Piaget (1990), que aborda o conceito de deformação e sua relação com a proporcionalidade, destacando uma pesquisa sobre a distributividade no estiramento de um elástico.



Figura 6 - Ponte de Concreto Protendido de Freyssinet.  
Fonte: Breve História... (2002).

<sup>2</sup> Em 1729 Belidor (1697 – 1761) publicou o livro *La Science des Ingénieurs*, que passa a propor uma abordagem mais racional nos cálculos de vigas, possibilitada pela utilização do Cálculo Infinitesimal.

**ESTRUTURALÓGICO-MATEMÁTICA E FÍSICA:** a flexão precisa ser compreendida fisicamente a partir de uma modelagem lógico-matemática. Não basta mais compreender deslocamentos, e sim deformações. Estas precisam estar relacionadas com o estudo das tensões, gerando o famoso diagrama tensão-deformação. Piaget (1990), ao descrever suas investigações sobre a deformação de um elástico, apresenta os fundamentos lógico-matemáticos deste período. Nos primeiros estágios, a partir do raciocínio aditivo, fica-se com o entendimento de que a alongamento ocorre apenas nas extremidades. Posteriormente, após a construção da propriedade distributiva, baseada no raciocínio multiplicativo, é que se compreende a distribuição daquele alongamento em todo o elástico. A generalização desse comportamento para elásticos de diferentes tamanhos e diferentes materiais está no cerne da Resistência dos Materiais, e só é possível a partir de uma generalização do princípio multiplicativo: a proporcionalidade. O sujeito passa a compreender a importância da relação entre o alongamento e o tamanho inicial do elástico, sendo esta relação mais importante que o valor absoluto do alongamento. Um elástico de 20 cm que alonga 1 cm deformou menos que outro com 5 cm que alonga a mesma quantidade. Ou seja, estabelece-se a proporcionalidade, conceito fundamental para a engenharia estrutural, que considera grande parte dos materiais na sua fase de deformação elástica.

### 5) O estado da arte

Atualmente, existe uma nova abordagem epistemológica no cálculo de estruturas. Depois do surgimento do Método dos Elementos Finitos (MEF), novas questões e novas estruturas surgem a partir de análises cada vez mais microscópicas, sendo mais importante deixar de se considerar a estrutura como um único material. O MEF trata das leis matemáticas que discretizam as estruturas em elementos finitos e passa a analisar cada elemento dessa estrutura. Obtém maior precisão, pois tudo que se fazia anteriormente na estrutura em suas dimensões reais, faz-se agora em cada elemento. Desta forma, é possível se considerar descontinuidades no material, que podem ser contempladas atribuindo-se propriedades específicas para os elementos situados no local das descontinuidades. Além disso, pode-se focar comportamento de trincas, efeito do vento e outros efeitos de alta complexidade. Não costuma ser objeto de estudo dos estudantes de arquitetura tal método, porém convém tratar com os alunos os alcances dessa teoria para situá-los nas possibilidades estruturais que uma construção pode ter.

## Conclusão

Considera-se que muito se pode fazer para possibilitar uma forma mais construtiva e dinâmica de se tratar o ensino de sistemas estruturais no curso de arquitetura. Nesse artigo mostra-se como um estudo epistemológico genético, da construção de pontes ao longo da história, pode contribuir para uma intervenção didática em sala de aula. A mesma construção de paradigmas pode ocorrer quando os alunos se deparam com novos conceitos. Tal paralelo e o uso de analogias pode ajudar a valorizar alguns posicionamentos intuitivos dos alunos, mesmo que estejam equivocados momentaneamente. O importante é enfatizar que podem estar corretos em certos aspectos, da mesma forma que os arcos construídos pelos etúrios no seu tempo estavam.

## Referências Bibliográficas

- BECKER, F. Aprendizagem e Ensino: contribuições da epistemologia genética. In: **Formação do Engenheiro**. Florianópolis: Editora da UFSC, 1999.
- BREVE HISTÓRIA DA ENGENHARIA DAS ESTRUTURAS. Disponível em: < <http://www.lmc.ep.usp.br/people/otavio/estruturas/historia.htm> >. Acesso em: 15 abr. 2002.
- DION, S. M.; PACCA, J. L. A. História da Ciência e Ensino de Física. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA, 26, 1998. **Anais...** ABENGE, 1998
- FRANCO, S. R. K. **O construtivismo e a educação**. Porto Alegre: Mediação, 1997.
- KUHN, T. A **Estrutura das Revoluções Científicas**. São Paulo: Editora Perspectiva, 2001

PIAGET, J. **Epistemologia Genética**. São Paulo: Martins Fontes, 1990.

PIAGET, J. **La Naissance de l'intelligence chez l'Enfant**, Neuchatel: Delachaux et Niestle, 1966.

PIAGET, J. **Problèmes de Psychologie Génétique**. Paris: Éditions Denöel-Gonthier, 1972.

PIAGET, J. **Logica e conhecimento científico – 1º volume**. Porto: Civilização, 1980.

PONTE DU GARD. Disponível em: < <http://www.lmc.ep.usp.br/people/otavio/estruturas/gard.htm>>. Acesso em: 25 abr. 2002.

TIMOSHENKO, S. P. **History of strength of materials : with a brief account of the history of theory of elasticity and theory of structures**. New York: McGraw-Hill, 1953.