

# 13\_18 QUALIDADE DO PROJECTO SOFTWARE E PROJECTO ESTRUTURAL: ERROS DE PROJECTO E OS SISTEMAS DE CÁLCULO AUTOMÁTICO

João Manuel Catarino Santos  
Engenheiro Civil,  
Director Geral da Central Projectos  
jc@centralprojectos.pt

Bruno Miguel Simões Marques  
Engenheiro Civil,  
Coordenador do Departamento de Estruturas  
da Central Projectos  
brunom@centralprojectos.pt

Existe actualmente no mercado uma grande diversidade de programas de cálculo automático (*software*) de estruturas que realizam a análise, dimensionamento e desenho estrutural. No decorrer da actividade de análise e revisão de projecto, realizada pelos autores, verificaram-se alguns erros que podem ser relacionados com a utilização das referidas aplicações. É objectivo deste artigo alertar para uma tomada de consciência na utilização destas ferramentas, valorizando uma utilização legal, segura, responsável e que vise a qualidade do produto final. O *software* de cálculo automático deve ser encarado como uma ferramenta de apoio ao projecto que, quando bem manuseada, permite uma maior rentabilidade de tempo e consequentes custos, facilitando a utilização desse tempo na procura de uma maior qualidade no projecto estrutural.

## 1. INTRODUÇÃO

É com alguma frequência que se comentam os erros dos projectos de estruturas e se relacionam esses erros com o *software*. Poucos estudos comparativos foram feitos ao *software* de cálculo [1]. Apresenta-se aqui uma visão pessoal sobre algumas das situações verificadas no âmbito da actividade desempenhada nos últimos anos, onde foram analisadas ou revistos mais de 200 projectos de estruturas. A abordagem não é estatística e o objectivo é apenas contribuir com

a apresentação de situações verificadas no passado e eventualmente alertar e prevenir, perspectivando o que se consideram ser as causas dos erros.

Num estudo sobre a qualidade dos projectos [2], 64% foram classificados com nota "médio-baixa" ou "insuficiente", e só 2% obtiveram "bom".

Atribuem-se por vezes algumas das deficiências de projecto ao *software* existente no mercado. As causas apontadas são por vezes a eventual falta de manuais em Português, a assistência técnica, a não conformidade com a regulamentação nacional, a dificuldade de parametrização ou ainda um comportamento tipo "black box".

Algumas das críticas anteriores podem ser justificadas, mas deixa no entanto de fora as verdadeiras causas do problema. A utilização de *software* ilegal, o excesso de confiança no *software*, tempo de formação ou treino insuficiente, falta de "Coaching", utilização em situações fora do âmbito para o qual foi desenvolvido, falta de conhecimento dos pressupostos de cálculo, de entre muitas outras causas.

É inquestionável a utilidade do *software* no apoio ao projecto, na obtenção de soluções optimizadas, de entre várias alternativas, na capacidade de avaliar comportamentos, na rentabilidade, na realização de tarefas repetitivas e ainda na facilidade com que se realizam alterações a meio do projecto. Naturalmente que tudo isto é válido apenas se usarmos estas ferramentas com a necessária responsabilidade.

Nos parágrafos seguintes descrevem-se algumas das situações encontradas em projectos de estruturas de betão e dá-se uma visão das possíveis causas.

## 2. LIMITAÇÕES DO SOFTWARE

Quando surgiram as primeiras ferramentas nacionais de *software* estrutural, estas eram relativamente simples e essencialmente di-

rigidas ao cálculo de esforços em estruturas hiperestáticas. Com o passar do tempo foram surgindo mais soluções nacionais e estrangeiras que evoluíram para sistemas integrados de análise, dimensionamento e desenho estrutural, em ambientes gráficos de pré e pós processamento muito sofisticados. Nesta corrida, talvez por dificuldades relacionadas com a dimensão do mercado, ou ainda por menor dinamismo comercial, foram desaparecendo as soluções nacionais estando o mercado neste momento, dominado por soluções estrangeiras. Na utilização destas soluções deve ter-se especial atenção quanto à sua adequação à regulamentação nacional, nomeadamente na quantificação de acções, regras de dimensionamento e pormenorização de armaduras. No futuro próximo os Eurocódigos poderão servir de plataforma de uniformização para a maioria destas aplicações.

Não existirá seguramente nenhum produto que nos possa garantir que não tenha erros ou "bugs" incomodativos, mas não estará aí o maior problema. A aparente facilidade de utilização, proporcionada pelas excelentes interfaces gráficas, associada à maior complexidade técnica do *software*, é seguramente a maior dificuldade.

O *software* existente no mercado procurou duas vias para satisfazer os seus clientes. A primeira via, supostamente mais técnica, procurou desenvolver um produto que permita ao utilizador tomar as opções no que respeita ao tipo de elemento a usar na discretização estrutural, à densidade desses elementos, as acções são introduzidas manualmente, as opções relacionadas com o comportamento estrutural são quase todas parametrizáveis e o dimensionamento e desenho é acompanhado elemento a elemento com interferência do utilizador.

A segunda via, associada a uma maior facilidade de utilização, porventura mais comercial, faz de forma automática a selecção dos elementos da discretização com base na geometria fornecida, a sua geração, o carregamento da estrutura e

ainda o dimensionamento e desenho. Neste tipo de *software* cabe ao Engenheiro a concepção do modelo estrutural e a configuração e parametrização dos critérios usados na análise, dimensionamento e desenho automático.

As duas vias podem potenciar erros associados. A primeira tem maior interferência do utilizador pelo que poderá ter associada uma maior probabilidade de erro humano, exige um maior conhecimento técnico e representa em geral um maior tempo de produção associado. A segunda representa uma maior automação pelo que poderá gerar erros relacionados com desconhecimento dos pressupostos usados no processo.

Em algum do *software* existente no mercado os erros produzidos na fase de cálculo não são reportados ou não são suficientemente claros. A verificação dos estados limite de utilização, percentagens máximas e mínimas de armadura, limites máximos de esforço transversal e punção, entre outros, poderiam ser reportados, evitando a verificação sistemática pelo utilizador. A produção automática de um conjunto de avisos pode em geral melhorar a utilização e detectar erros de modelação como este.

## 3. ERROS NA ABÓRDAGEM DO UTILIZADOR

O maior erro que se pode cometer em qualquer actividade é não ter qualificação técnica para a desempenhar. A tarefa está comprometida antes de se iniciar. Para a redução destes erros é fundamental ter uma formação de base adequada, possuir experiência suficiente para o caso em estudo, realizar formação e actualização de conhecimentos de forma continuada e procurar ter um ambiente de trabalho que promova o controlo e troca de experiências. O *software* escolhido para a realização dum cálculo automático deve ser bem conhecido. Para este fim devem ser fornecidos manuais de utilização numa língua que se domine. A possibilidade de se recorrer a serviços técnicos qualificados do representante do



> 1

*software*, para o esclarecimento de dúvidas poderá também representar uma mais valia. A opção de adquirir uma ferramenta de cálculo deixa-se muitas vezes para o último minuto, existindo por vezes um prazo já acordado com um cliente para a entrega de um trabalho.

O *software* é uma ferramenta e apenas pode indicar, pela análise cuidada dos resultados, se o modelo estrutural é adequado. A inadequação de um modelo estrutural, na escolha do tipo de laje, densidade de pilares, paredes ou outros sistemas de contraventamento mal distribuídos pode comprometer todo o desempenho. Um exemplo verificado com alguma frequência refere-se a estruturas com grandes impulsos horizontais, resultantes, por exemplo, de impulsos de terras em vários pisos, apenas numa das fachadas, com desequilíbrio na distribuição da rigidez dos elementos verticais. A título indicativo, na Figura 1 representa-se uma planta estrutural onde o centro de rigidez (C.R.) está muito desfasado do centro de massa (C.M.) da planta, devido ao posicionamento das paredes. A torção global do edifício agrava o punçãoamento excêntrico nos pilares, que no caso estudado sobredimensionava os capitéis da laje em 30 cm. A solução é naturalmente simples e passa por introduzir algumas paredes adicionais de forma a reduzir a excentricidade.

Os erros de concepção são inúmeros e acrescenta-se apenas os que dizem respeito a:

- > Falta ou excesso de rigidez horizontal;
- > Falta ou excesso de rigidez de flexão em vigas e lajes. Como exemplo refira-se o

caso de pórticos com vigas da mesma altura das lajes aligeiradas de vigotas que nelas apoiam;

- > Excesso de pilares apoiados em vigas;
- > Falta de juntas de dilatação ou do correspondente cálculo térmico e de retração do betão.

#### 4. ERROS NA FASE DE ANÁLISE ESTRUTURAL

##### 4.1. Construção do Modelo Estrutural

Existe hoje *software* de cálculo tridimensional muito sofisticado. A escolha deve ser adequada ao trabalho a desenvolver. Um *software* muito mais complexo do que é necessário ao desenvolvimento do trabalho habitual cria uma curva de aprendizagem mais lenta e acentua a probabilidade de mais erros na fase de arranque. Mesmo que a escolha recaia sobre uma solução mais complexa é de extrema importância realizar testes simples, em modelos cujo controlo seja fácil de executar. Alguns exemplos incluem estruturas de poucos elementos, com discretizações diferentes, simétricas, de vão e altura crescente ou já calculadas com outro *software*.

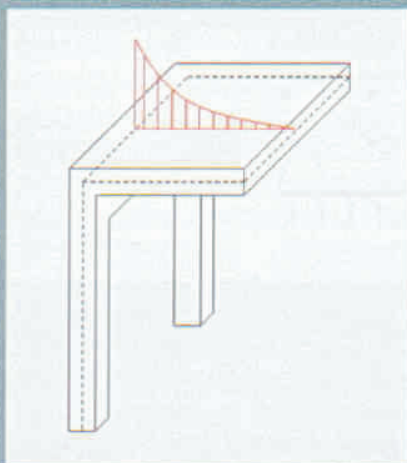
Dentro dos erros de modelação, uma situação verificada com alguma frequência tem a ver com a preocupação de modelar geometria em vez de modelar comportamentos. Um exemplo simples tem a ver com o estudo de um elemento como viga ou pilar. Quando modelamos geometria o que é vertical é pilar e o que é horizontal é viga. Um elemento vertical com fortes cargas transversais aplicadas no vão pode não dispensar o estudo ao esforço transverso, e um

elemento horizontal com fortes cargas axiais pode carecer de um estudo ao estado limite último (E.L.U) de encurvadura.

Ao elaborar um modelo estrutural em elementos finitos é necessário decidir sobre a densidade da discretização. Uma discretização muito apertada aumenta desnecessariamente o tempo de cálculo; enquanto o contrário pode provocar erros grosseiros na solução.

Dentro desta categoria cabem ainda as seguintes situações:

- > Modelação de lajes por método de grelha, com ou sem rigidez torcional, versus elementos finitos do tipo casca. A distribuição de esforços e necessariamente o carregamento das vigas será diferente;
- > A consideração de lajes indeformáveis no plano (apenas são permitidos deslocamentos de corpo rígido no plano, com três graus de liberdade independentes por nó), quando existe a possibilidade de ocorrerem deslocamentos independentes entre duas zonas dessa planta. A diferença consiste em considerar 3 ou 6 graus de liberdade independentes por nó;
- > A redução do piso a um elemento rígido no plano como descrito anteriormente provoca o bloqueamento do topo de um muro em consola no prolongamento do muro de cave. Este efeito pode ainda deturpar a análise de um piso só com vigas e sem laje, como é o caso frequente de edifícios industriais em betão com cobertura metálica;
- > Numa modelação tridimensional é necessário definir a rigidez torcional dos



&gt; 2

elementos lineares, nomeadamente nos elementos de vigas. Uma rigidez baixa em situações de torção de equilíbrio (necessária para garantir o equilíbrio, Figura 2) pode produzir uma distribuição de esforços pouco realista devido à grande necessidade de rotação da viga para equilibrar as acções. Por outro lado uma rigidez torcional elevada, em situações de torção de compatibilidade (Figura 3) pode originar o aparecimento de torção não desejável em vigas;

- > Escolha inadequada dos elementos finitos na definição da modelação de pilares, teoria das peças lineares, ou paredes, elementos finitos de superfície;
- > Falta de graus de liberdade nos elementos de viga por exemplo na análise de momentos horizontais e esforço axial;
- > Não contabilização da excentricidade entre os eixos de dois troços de pilar de secção diferente;
- > Não contabilização da excentricidade entre o eixo da viga e o eixo de um pilar.
- > Redistribuição de esforços automática sem considerar as limitações impostas pela ductilidade;
- > Divisão da estrutura em partes e não consideração correcta do efeito acção-reacção. O erro de substituir uma barra, num nó de



&gt; 3

continuidade entre dois elementos, por um apoio externo é frequente;

- > Introdução de rótulas ou outras libertações sem a correspondente pormenorização.

#### 4.2 Modelação das condições de fronteira

O modelo estrutural liga-se ao exterior pelas condições de fronteira que em muitos casos coincidem com as fundações. Descrevem-se de seguida alguns erros relacionados com esta modelação:

- > Cálculo isolado às acções horizontais de elementos, nomeadamente caixas de escada, de elevador e muros de suporte. A restante estrutura é calculada às acções verticais, com apoio nas caixas e muros. Os pórticos que apoiam nestes elementos não são compatibilizados na deformação horizontal. Um exemplo analisado consistia num muro de suporte de terras com 12 metros de altura, calculado em consola, às acções horizontais e que estruturalmente integrava uma fachada. Os pórticos do edifício foram apenas calculados às acções verticais com apoios simples nas vigas a simular a existência de um muro. Neste modelo perdeu-se a interacção do muro com o pórtico, não sofrendo o pórtico os deslocamentos horizontais associados ao deslocamento do muro, nem o muro as reacções horizontais da respectiva laje. O cálculo conjunto melhoraria o modelo e evitaria os problemas de fissuração verificados nos pórticos;
- > O cálculo de estruturas com mais de um material, como por exemplo aço e betão são muitas vezes analisados em programas diferentes. O problema é idêntico ao anterior uma vez que as reacções da estrutura suportada são calculadas como se esta fosse rigidamente encastrada ou apoiada na estrutura que lhe dá apoio. As reacções assim calculadas na primeira estrutura são aplicadas na segunda. O erro resulta de não se considerar a flexibilidade dos apoios no cálculo da estrutura suportada, com a conseqüente alteração das reacções que são transportadas para a estrutura de suporte. A solução passa por modelar a estrutura como um todo, ou ter em atenção o comportamento flexível;
- > Não consideração da deformabilidade do solo em situações em que as reacções verticais dos pilares são muito diferentes. Na presença desta deformabilidade e na transição entre dois corpos de altura muito diferente surgem assentamentos diferenciais importantes. As soluções passam por criar uma junta entre os corpos, ou reforçar os elementos de ligação

> Figura 2: Exemplo de Torção de Equilíbrio.

> Figura 3: Exemplo de Torção de Compatibilidade.

entre os dois corpos;

- > Falta de compatibilização de assentamentos entre zonas de fundações assentes em estratos rígidas e flexíveis. Um exemplo é a estrutura com fundações assentes em aterro e em escavação;
- > Fundações muito próximas em planta e a níveis diferentes. É habitualmente necessário levar a fundação localizada numa cota superior até um nível inferior, devido à necessidade de realizar um talude de escavação;
- > Fundações flexíveis consideradas como encastramentos no modelo. A dificuldade de impedir a rotação ou assentamento na base é tanto maior quanto mais brando for o solo. A rotação diminui o grau de encastramento, altera a distribuição de esforços e aumenta o comprimento de encurvadura dos elementos verticais.

#### 4.3 Quantificação e combinação de acções

A quantificação de acções, nalgum *software*, é feita de forma automática para situações padrão. Os problemas surgem na análise de situações singulares onde as acções devem ser introduzidas manualmente.

O programa do cliente deve ser claro e evitar situações onde não se sabem quais são as cargas de projectos. Edifícios comerciais e de distribuição alimentar analisados usam acções variáveis nos armazéns com valores compreendidos entre 5 e 20kN/m<sup>2</sup>. Os dois valores podem estar correctos dependendo dos requisitos do cliente. Nos casos de cargas elevadas é muito importante realizar a alternância espacial da carga (carregamento em xadrez nas lajes e alternado nas vigas).

Os revestimentos, camadas de forma e enchimentos devem ser correctamente avaliados para não provocar um excesso ou défice de carga. É importante o acompanhamento do projecto pelas diversas especialidades uma vez que a espessura destas camadas influencia a passagem de instalações técnicas.

A análise à acção do vento ou sismo é por vezes desprezada. Embora em algumas situações isto seja lícito, pode gerar erros inesperados.

A escolha inadequada do método de cálculo sísmico pode também introduzir erros importantes.

#### 4.4 Análise de resultados

As situações verificadas com maior frequência dizem respeito à falta de verificação. Neste campo inclui-se:

- > A verificação aos estados limites de utilização, nomeadamente no cumprimento das situações limite de deformação e fissuração em lajes e vigas;
- > A não consideração dos efeitos não lineares geométricos e do material nas situações anteriores. Usa-se, erradamente, o valor resultante do cálculo linear como valor da deformação;
- > A confusão entre deformação global de um nó numa estrutura com a deformação relativa entre dois nós adjacentes. Não é correcto comparar o deslocamento global de um nó de uma laje, no último piso de um edifício alto, com os limites de deformação de uma laje. O primeiro incorpora os deslocamentos dos pilares dos pisos inferiores;
- > A verificação do valor limite de resistência ao esforço transversal e punçoamento;
- > A não verificação das percentagens máximas e mínimas de armaduras nos elementos estruturais. Se no pós cálculo se verificar que se ultrapassou a percentagem máxima obrigará a

um aumento da dimensão do elemento, da respectiva rigidez e a um novo cálculo;

- > A deformação horizontal excessiva que pode ser controlada globalmente pelas frequências próprias de vibração em função da altura ou pela deformação relativa entre dois pisos;
- > Comportamento sísmico inadequado com falta ou excesso de rigidez horizontal, falta de ductilidade, com pilares menos resistentes do que as vigas, vigas de rigidez e resistência constante ou crescente em altura concentrando a libertação de energia e danos nos pisos inferiores.

## 5. NA FASE DE DIMENSIONAMENTO

Na fase de dimensionamento a maioria dos programas de cálculo automático, quando se verificam algumas situações anómalas, geram erros de dimensionamento. O desconhecimento por parte do utilizador destas mensagens, ou a sua incorrecta interpretação pode dar origem a situações de erros. Nestas circunstâncias a probabilidade do erro ser real é maior uma vez que já foi usado um critério automático para o identificar. Deve ser dado um especial cuidado a este tipo de mensagens, à sua interpretação e identificação das situações em que são gerados. O recurso a exemplos simples ajudam a clarificar a situação. A existência de erros nas fases anteriores, nomeadamente na obtenção de esforços, transporta erros até esta fase. Um olhar experiente ou até a comparação de indicadores como as densidades de aço de outros projectos podem revelar a existência de possíveis erros.

Neste capítulo podem-se incluir erros do tipo:

- > Comprimentos de encurvadura incorrectamente avaliados. Este erro está por vezes associado à classificação das estruturas como sendo de nós fixos ou nós móveis;
- > Elementos dimensionados como pilares quando têm comportamento de viga ou vice-versa. Embora os estados limite últi-

- mos a verificar possam ser os mesmos, se a rotina de cálculo automático for completa, as disposições construtivas são diferentes;
- > Consideração de elementos como muros ou paredes. No primeiro caso as armaduras horizontais devem ser colocadas pelo interior e no segundo pelo exterior;
- > Utilização duma classe de betão inadequada para a classe de exposição ambiental;
- > Recobrimento inadequado face à classe de exposição ambiental ou protecção ao fogo. O posicionamento das armaduras afecta a resistência das peças com especial relevância em peças de pequena dimensão;
- > Não consideração de todos os esforços ou tensões na dimensionamento. Dentro desta categoria cabem os momentos torsores em lajes e as tensões de corte em paredes.

## 6. NA FASE DE DESENHO E COMPILAÇÃO TÉCNICA

Num número significativo de projectos analisados não houve um necessário tratamento de armaduras. Algum do *software* produz de forma automática desenhos de plantas estruturais, armadura em quadros de pilares, vigas, lajes e fundações. Em alguns casos é possível parametrizar um conjunto de opções que tornam os desenhos mais próximos do que é exigível num projecto de execução, no entanto, não existe *software* que dispense a intervenção do Engenheiro na obtenção de um conjunto de peças desenhadas congruentes. Alguns erros incluem:

- > Pouco tempo dedicado ao tratamento dos desenhos;
- > Excesso de desenhos com pormenorização de todos os elementos estruturais ao invés de recorrer a alguns quadros, por exemplo o quadro de pilares ou sapatas;
- > Excesso de variação dos diâmetros e comprimentos de armaduras, nomeadamente em vigas e lajes tornando o desenho complexo;
- > Sobreposição de elementos gráficos e textos com falta de clareza na leitura;
- > Falta de comprimento de amarração e emenda das armaduras. Verificam-se por vezes armaduras muito curtas que não cumprem sequer os comprimentos referidos;
- > Densidades excessivas com espaçamentos muito pequenos, ou o contrário.

## 7. CONCLUSÃO

Das situações apresentadas fica clara a ideia de que a maioria dos erros verificados não são intrínsecos ao *software*, mas antes à sua utilização. Ouve-se por vezes comentários do tipo "o computador está a pensar" ou "o computador é que calculou" que mostram o excesso de confiança que se deposita na tecnologia, com uma aparente falta de reconhecimento da responsabilidade do utilizador. O *software* deve ser encarado como uma ferramenta com vários acessórios, que podem ser mudados consoante o trabalho a desempenhar, incapaz de trabalhar sem a perícia do seu utilizador. Não executar com o *software* o que não seríamos capazes de executar em cálculo manual parece ser um bom princípio.

Em quase todos os projectos de engenharia, existe algum sistema de controlo da qualidade. Em relação ao projecto de estruturas não existe actualmente nenhum sistema de controlo. Muito se tem falado em seguros, certificação e verificação aleatória de projectos mas até à data apenas existe o mercado de oferta e procura. Hoje os projectos de Engenharia são de complexidade crescente e recomenda-se cada vez mais um trabalho em equipa e uma especialização adequada. Neste contexto o *software* pode desempenhar um papel importante na procura de soluções óptimas. Um último erro, frequentemente esquecido, que vale a pena referir a título conclusivo, tem a ver com a contratação do projecto ao menor preço. Seguramente um erro de quem projecta, mas também um erro de quem contrata.

## REFERÊNCIAS

- [1] LOURENÇO, P.B. *et al*, "Análise de Duas Estruturas Porticadas em Betão Armado com Recurso a Cinco Programas de Cálculo Automático", em Actas do V Encontro Nacional de Mecânica Computacional, Ed. por P.B. Lourenço e J.B. Martins, Universidade do Minho, 1997, p. 1193-1243.
- [2] RIBAS, D., FIGUEIRAS, J.A., A Qualidade do Projecto de Estruturas de Betão em Edifícios, *Ingenium*, 42, 1999.